

UNIVERSITÉ DU QUÉBEC

MÉMOIRE PRÉSENTÉ À
L'UNIVERSITÉ DU QUÉBEC À TROIS-RIVIÈRES

COMME EXIGENCE PARTIELLE
DE LA MAÎTRISE EN SCIENCES DE L'ENVIRONNEMENT

PAR
STEPHAN VEILLEUX

APPLICATION D'UN CHANGEMENT BRUSQUE DE pH SUR LES JEUNES
STADES DU MEUNIER NOIR (*Catostomus commersoni*), COMME MODE DE
CONTRÔLE DE L'ESPÈCE SUR LES FRAYÈRES

JUILLET 1996

Université du Québec à Trois-Rivières

Service de la bibliothèque

Avertissement

L'auteur de ce mémoire ou de cette thèse a autorisé l'Université du Québec à Trois-Rivières à diffuser, à des fins non lucratives, une copie de son mémoire ou de sa thèse.

Cette diffusion n'entraîne pas une renonciation de la part de l'auteur à ses droits de propriété intellectuelle, incluant le droit d'auteur, sur ce mémoire ou cette thèse. Notamment, la reproduction ou la publication de la totalité ou d'une partie importante de ce mémoire ou de cette thèse requiert son autorisation.

RÉSUMÉ

Le Meunier noir (*Catostomus commersoni*) a été introduit par l'homme dans plusieurs plans d'eau à Omble de fontaine (*Salvelinus fontinalis*) du bouclier laurentien (Québec, Canada). La présence du Meunier noir peut avoir un impact négatif sur l'Ombre de fontaine en diminuant considérablement son abondance et son potentiel d'exploitation par la pêche sportive. Dans le cadre d'un projet de développement de modes de contrôle des espèces compétitrices de l'Ombre de fontaine, nous avons vérifié l'effet d'un changement brusque de pH sur les jeunes stades de développement du Meunier noir. Ce projet a été confié au Laboratoire de recherche sur les communautés aquatiques de l'Université du Québec à Trois-Rivières par le Ministère de l'Environnement et de la Faune et la Fondation de la Faune du Québec. L'étude d'un changement brusque de pH sur la mortalité des jeunes stades de développement du Meunier noir s'est déroulée en laboratoire (expériences L1 et L2) et en milieu semi-naturel (expériences T1 et T2). Les objectifs spécifiques de ce projet ont été 1) d'étudier l'effet d'un changement brusque de pH de courte durée sur les jeunes stades de développement du Meunier noir en prévision d'un contrôle, 2) de comparer les résultats obtenus en laboratoire avec ceux recueillis en milieu semi-naturel et 3) de préciser le stade de développement, le pH et le temps de contact requis pour effectuer un contrôle efficace des jeunes stades du Meunier noir. Les traitements acides (pH 2.5, 3.0, 3.5, 7.0) et basiques (pH 7.0, 10.5, 11.0, 11.5) ont été effectués sur trois stades de développement du Meunier noir: l'oeuf fraîchement fertilisé, l'oeuf oeillé et la larve vésiculée.

Le traitement acide de pH 2.5 au stade d'oeuf fraîchement fertilisé a occasionné plus de mortalité à court terme (24 heures après les traitements). La mortalité

obtenue après ce traitement a varié entre 74.6% et 98.5%. Elle était inférieure à 3.2% pour les autres traitements acides (pH 3.0, 3.5 et 7.0). La différence de mortalité entre le traitement de pH 2.5 et les autres traitements acides s'est estompée en fonction du temps. Les traitements basiques ont causé des mortalités beaucoup moins importantes que le traitement acide de pH 2.5. Cependant, un traitement basique de pH 11.5 en laboratoire a causé des mortalités significativement différentes des autres traitements basiques 24 heures après l'application des traitements. La mortalité obtenue 24 heures après les traitements basiques en milieu semi-naturel était inférieure à 2%.

L'oeuf oeillé a semblé être plus tolérant aux traitements étudiés que l'oeuf fraîchement fertilisé. Les mortalités obtenues 24 heures après les traitements sur le stade d'oeuf oeillé étaient relativement faibles. Par contre, le traitement de pH 2.5 a causé une mortalité significativement plus élevée que les autres traitements pour l'expérience L1, et ce même traitement a occasionné une mortalité plus élevée que les traitements de pH 3.0 et 3.5 pour l'expérience T2. Les traitements basiques n'ont pas montré de différence de mortalité entre les traitements, sauf pour l'expérience L1, où le traitement de pH 11.5 a causé une mortalité supérieure aux autres traitements basiques, 24 heures après ces traitements.

Les traitements au stade de larve vésiculée ont montré que ce stade de développement présentait une sensibilité intermédiaire entre celles de l'oeuf fraîchement fertilisé et de l'oeuf oeillé. Quelques différences significatives de mortalité entre les traitements ont été obtenues. Par contre, ces mortalités n'étaient pas en relation avec l'intensité des traitements.

La comparaison des mortalités entre les expériences (pour un même traitement) a montré que les mortalités étaient similaires entre les expériences L2, T1 et T2. Cependant, l'expérience L1 a montré à quelques reprises des différences de

mortalité comparativement aux trois autres expériences. Le suivi du développement des individus de l'expérience L2 n'a pas montré de différence entre les traitements acides ni entre les traitements basiques.

Cette étude montre que dans les premiers stades de vie, le Meunier noir est relativement tolérant à un changement brusque de pH, de courte durée. Le plus grand pourcentage de mortalité a été obtenu après un traitement de pH 2.5 au niveau des oeufs fraîchement fertilisés. Les stades d'oeuf oeillé et de larve vésiculée sont plus tolérants aux traitements que le stade d'oeuf fraîchement fertilisé. La plus grande sensibilité de l'oeuf fraîchement fertilisé peut être attribuable à la plus grande perméabilité du chorion de l'oeuf durant ce stade de développement.

Dans les deux conditions expérimentales, la mortalité naturelle et celle causée par le système d'incubation semblent avoir masqué l'effet des traitements aux stades d'oeuf oeillé et de la larve vésiculée en début d'expérience, ainsi qu'à la fin des expériences pour les trois stades étudiés. Une chute de pH, qui est survenue en début d'incubation de l'expérience L1, semble avoir augmenté la sensibilité des individus et pourrait expliquer les différences de mortalité entre cette expérience et les expériences L2, T1 et T2. Mis à part le fort taux de mortalité naturelle et/ou de l'effet du système d'incubation, la sensibilité des individus a varié en fonction du stade de développement, du type de traitement (acide-basique) et du pH des traitements.

Cette étude a permis d'évaluer les traitements nécessaires pour causer des mortalités non négligeables chez les jeunes stades du Meunier noir. Dans le contexte d'un traitement en milieu naturel, les quantités d'acide sulfurique et de chaux hydratée nécessaires pour atteindre un pH de 2.5 et 11.5 seraient relativement grandes compte tenu des débits des cours d'eau à traiter. De plus,

l'obtention des pH souhaités en milieu naturel serait d'autant plus difficile à obtenir que les effets les plus nocifs entre les pH 2.5 et 3.0 s'estompent rapidement. Une augmentation de la dose de traitement serait alors nécessaire. Les résultats suggèrent donc que cette approche offre un faible potentiel pour le contrôle du Meunier noir. Cependant, ce projet représente la première tentative d'utilisation du pH comme mode de contrôle d'une espèce de poisson et permet de confirmer qu'il serait hasardeux de poursuivre dans cette voie. D'autre part, les résultats de cette étude pourraient servir de base à une recherche plus élaborée, visant à déterminer les seuils limites de variations brusques du pH chez les poissons, dans le cadre d'accidents environnementaux par exemple.

REMERCIEMENTS

Je tiens à remercier sincèrement mon directeur de recherche, le Dr Pierre Magnan. Son support et son encouragement constant sont dignes de mention. J'apprécie particulièrement sa compréhension et son professionnalisme tout au long de mes études de deuxième cycle à l'UQTR.

J'aimerais remercier également Pierre East, Patrice Hamel et Michèle Lapointe pour leur aide inestimable à tous les niveaux du projet. Je leur suis reconnaissant pour leur temps, leurs idées et critiques.

Mes remerciements s'adressent aussi à Jean-Louis Benoit, Philippe Bourke, Dominique Brown, Gaston Lacroix, Nancy Laroque et Philippe Laurendeau pour leur assistance lors des expérimentations.

Ce projet a été financé par le Ministère de l'Environnement et de la Faune et par la Fondation de la Faune du Québec. Il s'inscrivait dans un programme de recherche sur les méthodes de contrôle du Meunier noir dans les lacs à Omble de fontaine.

TABLE DES MATIÈRES

	Page
RÉSUMÉ	i
REMERCIEMENTS	v
TABLE DES MATIÈRES	vi
LISTE DES TABLEAUX.....	ix
LISTE DES FIGURES	xi
LISTE DES ANNEXES.....	xii
1. INTRODUCTION.....	1
1.1 Problématique	1
1.2 Revue de littérature	4
1.2.1 Mortalité de différents stades de développement chez les poissons à pH acide.....	4
1.2.1.1 Effet d'un pH acide sur les gamètes.....	4
1.2.1.2 Effet d'un pH acide sur les oeufs fraîchement fertilisés	5
1.2.1.3 Effet d'un pH acide sur les oeufs oeillés	7
1.2.1.4 Effet d'un pH acide sur les larves vésiculées.....	8
1.2.2 Facteurs influençant la sensibilité des jeunes stades de poissons à un pH acide	10
1.2.2.1 Sensibilité et facteurs internes reliés à l'organisme.....	10
1.2.2.2 Effet de l'aluminium en conditions acides	12
1.2.2.3 Effet du calcium en conditions acides.....	15
1.2.2.4 Effet d'autres facteurs en conditions acides	15
1.2.3 Facteurs influençant la sensibilité des jeunes stades de poissons à un pH basique.....	16

2. MATÉRIEL ET MÉTHODES.....	18
2.1 Expériences en laboratoire.....	18
2.1.1 Gamètes.....	18
2.1.2 Incubation.....	18
2.1.3 Eau d'incubation.....	19
2.1.4 Traitements.....	20
2.1.5 Observations et prise des données.....	21
2.2 Expériences en milieu semi-naturel.....	21
2.2.1 Gamètes.....	21
2.2.2 Incubation.....	22
2.2.3 Eau d'incubation.....	22
2.2.4 Traitements.....	22
2.3 Analyses statistiques.....	23
3. RÉSULTATS.....	24
3.1 Nombre d'individus soumis aux traitements.....	24
3.2 Physico-chimie de l'eau d'incubation.....	24
3.3 pH effectif des traitements.....	27
3.4 Concentration des éléments analysés dans les solutions de traitement en milieu semi-naturel.....	27
3.5 Mortalité obtenue après l'application des traitements.....	28
3.5.1 Traitement acide sur les oeufs fraîchement fertilisés.....	28
3.5.2 Traitement basique sur les oeufs fraîchement fertilisés.....	32
3.5.3 Traitement acide sur les oeufs oeillés.....	32
3.5.4 Traitement basique sur les oeufs oeillés.....	38
3.5.5 Traitement acide sur les larves vésiculées.....	38
3.5.6 Traitement basique sur les larves vésiculées.....	46

3.6 Comparaison de la mortalité entre les expériences et pour un même traitement	46
3.7 Développement des individus après les traitements acides et basiques en laboratoire.....	53
4. DISCUSSION.....	54
5. RÉFÉRENCES	60

LISTE DES TABLEAUX

Tableau	Page
1. Nombre moyen d'oeufs par incubateur ± 1 É.-T. au début des expériences; expériences en laboratoire (L1 et L2), expériences en milieu semi-naturel (T1 et T2), minimum et maximum entre parenthèses. Le nombre d'oeufs par incubateur est égal à la somme des individus morts, des individus qui se sont rendus au stade de nage vers le haut et des individus toujours vivants à la fin de l'expérience.....	25
2. Physico-chimie de l'eau d'incubation; valeurs moyennes ± 1 É.-T., minimum et maximum entre parenthèses et nombre de mesures. Expériences en laboratoire (L1 et L2) et en milieu semi-naturel (T1 et T2).	26
3. Pourcentage moyen de mortalité (± 1 É.-T. entre parenthèses) des oeufs fraîchement fertilisés, 24 heures après un traitement acide et à la fin des expériences en laboratoire (L1 et L2); n = 5 réplicats par traitement	30
4. Pourcentage moyen de mortalité (± 1 É.-T. entre parenthèses) des oeufs fraîchement fertilisés, 24 heures après un traitement acide et à la fin des expériences en milieu semi-naturel (T1 et T2); n = 5 réplicats par traitement.....	31
5. Pourcentage moyen de mortalité (± 1 É.-T. entre parenthèses) des oeufs fraîchement fertilisés, 24 heures après un traitement basique et à la fin des expériences en laboratoire (L1 et L2); n = 5 réplicats par traitement	34
6. Pourcentage moyen de mortalité (± 1 É.-T. entre parenthèses) des oeufs fraîchement fertilisés, 24 heures après un traitement basique et à la fin des expériences en milieu semi-naturel (T1 et T2); n = 5 réplicats par traitement.....	35
7. Pourcentage moyen de mortalité (± 1 É.-T. entre parenthèses) des oeufs oeillés, 24 heures après un traitement acide et à la fin des expériences en laboratoire (L1 et L2); n = 5 réplicats par traitement.....	37
8. Pourcentage moyen de mortalité (± 1 É.-T. entre parenthèses) des oeufs oeillés, 24 heures après un traitement acide et à la fin des expériences en milieu semi-naturel (T1 et T2); n = 5 réplicats par traitement.....	39
9. Pourcentage moyen de mortalité (± 1 É.-T. entre parenthèses) des oeufs oeillés, 24 heures après un traitement basique et à la fin des expériences en laboratoire (L1 et L2); n = 5 réplicats par traitement	41
10. Pourcentage moyen de mortalité (± 1 É.-T. entre parenthèses) des oeufs oeillés, 24 heures après un traitement basique et à la fin des expériences en milieu semi-naturel (T1 et T2); n = 5 réplicats par traitement	42

11. Pourcentage moyen de mortalité (± 1 É.-T. entre parenthèses) des larves vésiculées, 24 heures après un traitement acide et à la fin des expériences en laboratoire (L1 et L2); n = 5 réplicats par traitement 44
12. Pourcentage moyen de mortalité (± 1 É.-T. entre parenthèses) des larves vésiculées, 24 heures après un traitement acide et à la fin des expériences en milieu semi-naturel (T1 et T2); n = 5 réplicats par traitement 45
13. Pourcentage moyen de mortalité (± 1 É.-T. entre parenthèses) des larves vésiculées, 24 heures après un traitement basique et à la fin des expériences en laboratoire (L1 et L2); n = 5 réplicats par traitement 48
14. Pourcentage moyen de mortalité (± 1 É.-T. entre parenthèses) des larves vésiculées, 24 heures après un traitement basique et à la fin des expériences en milieu semi-naturel (T1 et T2); n = 5 réplicats par traitement 49
15. Comparaison du pourcentage de mortalité cumulatif moyen (± 1 É.-T.) entre les expériences en laboratoire (L1 et L2) et en milieu semi-naturel (T1 et T2), à différentes périodes du développement; traitement sur les œufs fraîchement fertilisés..... 50
16. Comparaison du pourcentage de mortalité cumulatif moyen (± 1 É.-T.) entre les expériences en laboratoire (L1 et L2) et en milieu semi-naturel (T1 et T2), à différentes périodes du développement; traitement sur les œufs oeillés.....51
17. Comparaison du pourcentage de mortalité cumulatif moyen (± 1 É.-T.) entre les expériences en laboratoire (L1 et L2) et en milieu semi-naturel (T1 et T2), au début et à la fin des expériences; traitement sur les larves vésiculées 52

LISTE DES FIGURES

Figure	Page
1. Mortalité cumulative après un traitement acide sur les oeufs fraîchement fertilisés, pour les expériences en laboratoire (L1 et L2) et en milieu semi-naturel (T1 et T2)	29
2. Mortalité cumulative après un traitement basique sur les oeufs fraîchement fertilisés, pour les expériences en laboratoire (L1 et L2) et en milieu semi-naturel (T1 et T2)	33
3. Mortalité cumulative après un traitement acide sur les oeufs oeillés, pour les expériences en laboratoire (L1 et L2) et en milieu semi-naturel (T1 et T2)	36
4. Mortalité cumulative après un traitement basique sur les oeufs oeillés, pour les expériences en laboratoire (L1 et L2) et en milieu semi-naturel (T1 et T2)	40
5. Mortalité cumulative après un traitement acide sur les larves vésiculées, pour les expériences en laboratoire (L1 et L2) et en milieu semi-naturel (T1 et T2).....	43
6. Mortalité cumulative après un traitement basique sur les larves vésiculées, pour les expériences en laboratoire (L1 et L2) et en milieu semi-naturel (T1 et T2).....	47

LISTE DES ANNEXES

Annexe	Page
1. pH effectif des traitements.....	66
2. Liste des éléments analysés dans les solutions de traitement des expériences en milieu semi-naturel et limite de détection associée à chaque élément.....	68
3. Concentrations de l'Al (total et labile), Fe, Cu, Ca, Mg, Zn, Mn, Na, K, Ba et Cr dans les solutions de traitement de la première expérience en milieu semi-naturel (expérience T1).....	70
4. Concentrations de l'Al (total et labile), Fe, Cu, Ca, Mg, Zn, Mn, Na, K, Ba et Cr dans les solutions de traitement de la deuxième expérience en milieu semi-naturel (expérience T2).....	73

1. INTRODUCTION

1.1 Problématique

Les baisses sporadiques de pH en ruisseaux et en lacs ont été étudiées intensivement depuis quelques années, afin de mieux comprendre leurs impacts sur les populations de poissons. Les plans d'eau à faible pouvoir tampon sont en effet vulnérables à une acidification durant la fonte des neiges ou suite à des précipitations importantes (Jeffries *et al.*, 1979). L'acidification des milieux aquatiques contribue généralement à l'échec du recrutement des populations de poissons (Beamish et Harvey, 1972; Beamish *et al.*, 1975; Frenette et Dodson, 1984; McCormick *et al.*, 1989). Deux principaux facteurs peuvent contribuer à la disparition des populations ichtyennes en milieu acide; l'incapacité des géniteurs à initier un comportement de fraie et un taux de mortalité important survenant au cours du développement des jeunes stades (Baker et Schofield, 1982). Les études portant sur les effets de l'acidité ont été majoritairement réalisées chez les Salmonidés¹, en raison de l'importance de ce groupe dans les milieux sujets à l'acidification (Oyen *et al.*, 1991). Ces phénomènes ont aussi été étudiés chez d'autres familles de poissons, mais d'une façon beaucoup moins intensive.

En général, la sensibilité des poissons aux conditions acides est variable selon les espèces et dépend beaucoup des périodes et des sites de fraie d'une part et des stades de développement d'autre part (Holtze et Hutchinson, 1989). La plupart des études ont été effectuées sur les jeunes stades de développement car ce sont généralement les plus sensibles (McCormick *et al.*, 1989). Contrairement à l'acidification, peu d'études ont porté sur l'effet d'une hausse de l'alcalinité de l'eau

¹ L'emploi de la majuscule pour les noms d'espèces et familles est en accord avec la recommandation de Chabot et David (1986).

sur les poissons (Daye et Garside, 1980a). Une augmentation de pH serait probablement susceptible de nuire au recrutement et à la survie des poissons.

Le Meunier noir, *Catostomus commersoni*, a été introduit par l'homme dans plusieurs plans d'eau du Québec qui ne contenaient auparavant que de l'Ombre de fontaine, *Salvelinus fontinalis* (Magnan 1988; Magnan 1989; Magnan *et al.*, 1990; Magnan *et al.*, 1994). L'introduction de ce Catostomidé peut avoir un impact considérable sur les populations d'Ombre de fontaine, dont des diminutions de 30 à 70% de leur rendement à la pêche sportive (Magnan 1988). Même si aucune recherche ne semble avoir été réalisée en vue de quantifier les effets d'une variation brusque et passagère du pH (acide ou basique), la sensibilité des jeunes stades de développement des poissons laisse croire que de telles manipulations offrent un certain potentiel comme mode de contrôle du Meunier noir. Dans ce contexte, l'objectif de ce projet a été d'étudier l'effet d'un changement brusque de pH sur la mortalité des jeunes stades de développement du Meunier noir. Les expériences ont eu lieu en laboratoire, sous conditions contrôlées, et en milieu semi-naturel, de façon à intégrer le mieux possible les interactions avec les conditions du milieu (ex: interactions eau-sédiments). Comme la sensibilité au pH varie en fonction du stade de développement, trois stades ont été étudiés dans les deux conditions expérimentales: l'oeuf fraîchement fertilisé, l'oeuf oillé et la larve vésiculée.

Au départ, le potentiel de cette approche pour le contrôle du Meunier noir a été basé sur différents faits et hypothèses: (1) il y a concentration des individus sur une aire restreinte au moment de la reproduction, (2) il n'y a pas de recouvrement dans les périodes de reproduction des espèces à contrôler et à protéger, l'Ombre de fontaine frayant à l'automne et le Meunier noir au printemps, (3) chez les poissons, les jeunes stades sont très sensibles aux variations de pH (voir revue de littérature à

la section suivante), (4) un changement brusque de pH (quelques minutes) sur une frayère de Meunier noir ne serait pas nocif à l'Omble de fontaine, les individus pouvant éviter la zone affectée à cette période de leur développement et (5) un neutralisant (une base dans le cas d'un traitement acide ou un acide dans le cas d'un traitement basique) pourrait être ajouté après le traitement pour neutraliser ce dernier.

Les objectifs spécifiques de ce projet ont donc été 1) d'étudier l'effet d'un changement brusque de pH (acide et basique) de courte durée sur les jeunes stades de développement du Meunier noir en prévision d'un contrôle, 2) de comparer les résultats obtenus en laboratoire avec ceux recueillis en milieu semi-naturel et 3) de préciser le stade de développement, le pH et le temps de contact requis pour effectuer un contrôle efficace des jeunes stades du Meunier noir.

Ce projet a été effectué dans le cadre d'un programme plus vaste sur les méthodes de contrôle du Meunier noir dans les lacs à Omble de fontaine, où l'espèce a été introduite. Ce programme est mené par le Laboratoire de recherche sur les communautés aquatiques de l'Université du Québec à Trois-Rivières pour le compte du Ministère de l'Environnement et de la Faune (MEF) et de la Fondation de la Faune (FFQ) du Québec.

1.2 Revue de littérature

1.2.1 Mortalité de différents stades de développement chez les poissons à pH acide

1.2.1.1 Effet d'un pH acide sur les gamètes

Le pH de l'eau peut affecter la reproduction en empêchant la production de gamètes (Lee et Gerking, 1977), en provoquant leur expulsion ou en nuisant à la fertilisation (Sayer *et al.*, 1993). Une fécondation en milieu acide (pH 5.0) n'a entraîné aucun ou très peu de développement des stades subséquentes chez la Truite arc-en-ciel, *Onchorhynchus mykiss*, la Truite brune, *Salmo trutta* et l'Omble chevalier, *Salvelinus alpinus* (Gillet et Roubaud, 1986). La Carpe, *Cyprinus carpio*, le Carassin, *Carassius auratus*, le Gardon, *Rutilus rutilus*, la Truite arc-en-ciel, la Truite brune, le Corégone, *Coregonus shinizi palea*, l'Omble chevalier, le Grand Brochet, *Esox lucius* et la Perchaude, *Perca fluviatilis* exigeraient un milieu plutôt alcalin au moment de la fécondation. Aussi, la fertilisation dans une eau acide peut avoir un effet plus grand sur la mortalité s'il y a exposition ultérieure à l'acidité (Holtze et Hutchinson, 1989).

Après avoir été relâchée dans l'eau par la femelle, l'ovule va gonfler en augmentant son volume d'eau. Ce phénomène, qualifié de durcissement de l'oeuf, continue après la fécondation (Peterson et Martin-Robichaud, 1982) et peut être perturbé par différents pH. Ces auteurs ont noté une diminution de l'eau accumulée dans l'oeuf à pH 4.5 et 4.0 chez le Saumon atlantique, *Salmo salar*. La diminution de l'accumulation d'eau dans les oeufs fraîchement fertilisés pourrait avoir un effet sur la survie de ces oeufs, mais cette constatation reste à démontrer (Peterson et Martin-Robichaud, 1982).

1.2.1.2 Effet d'un pH acide sur les oeufs fraîchement fertilisés

Ce stade de développement est considéré comme important dans l'étude de la relation entre le pH et la mortalité (Sayer *et al.*, 1993). L'effet du pH sur la survie de l'oeuf a été étudié chez plusieurs espèces de poissons, mais plus particulièrement chez les Salmonidés. Une attention plus grande a été portée à cette famille à cause de sa valeur économique et sportive. Les études des Salmonidés sont également nombreuses à cause de leur présence dans les milieux ayant une faible capacité à neutraliser les précipitations acides. Ces derniers subissent une diminution importante de pH suite à des précipitations ou à la fonte des neiges dans les régions sujettes aux précipitations acides, créant ainsi un choc acide. Plusieurs auteurs ont noté une diminution de la survie des oeufs de Salmonidés à pH acides. Hurley *et al.* (1989) ont observé qu'à pH 3.9, presque tous les embryons sont morts à l'intérieur de quelques degrés-jours chez trois lignées d'Omble de fontaine. La survie des oeufs d'Omble de fontaine ne semble pas être affectée à pH 4.6, mais elle est grandement diminuée à des pH plus bas (Baker et Schofield, 1982). Trojnar (1977a) a obtenu une mortalité de 24% lorsque des oeufs d'Omble de fontaine ont été soumis continuellement à pH 4.7-4.9 tandis que Siddens *et al.* (1984) ont observé une mortalité de 100% à pH 4.0, une semaine après la fertilisation. Chez la même espèce, Ingersoll *et al.* (1990) ont obtenu une diminution du nombre d'oeufs qui survivent et éclosent à pH 5.2 et moins. Une exposition de sept jours à pH 4.5 a réduit significativement le nombre d'individus qui se sont développés jusqu'au stade oillé chez la Truite dorée, *Oncorhynchus aguabonita aguabonita* (DeLonay *et al.*, 1993). L'Omble chevalier a connu une mortalité de 100%, 53 heures après la fertilisation à pH 4.0 et 96 heures à pH 4.5 (Jagoe *et al.*, 1984).

L'effet du pH sur la survie des oeufs fraîchement fertilisés a été étudié chez d'autres espèces de poissons. Sayer *et al.* (1993) font une synthèse des recherches

de plusieurs auteurs sur la mortalité de plusieurs espèces de Saumons à différents pH. La comparaison des résultats est presque impossible en raison des divergences entre les conditions expérimentales. Cependant, l'oeuf fraîchement fertilisé est l'un des stades de développement où il y a le plus de mortalité à pH acide. Daye et Garside (1977) ont observé une mortalité de 100% chez le Saumon atlantique lorsque les oeufs fraîchement fertilisés ont été soumis à un pH 2.7 pendant une journée, pH 3.1 pendant deux jours, pH 3.3 pendant trois jours et une mortalité de 80% à pH 3.5 pendant 6.9 jours. À partir de ces résultats, ils ont obtenu une limite létale (limite de pH où il y a encore des individus qui survivent) de 3.6 unités pH pour les oeufs fraîchement fertilisés. Les mêmes auteurs ont observé une mortalité de 100% à pH 3.7, 40 jours après éclosion en 1979, tandis qu'au même pH, aucun embryon n'est mort après une exposition de 6.9 jours en 1977.

Holtze et Hutchinson (1989) ont observé 50% de mortalité à pH 4.7 après quatre jours d'exposition des oeufs chez le Meunier noir. Aucun oeuf de Meunier noir n'a survécu jusqu'au stade oeillé à pH 4.2 ou 5.0 (Baker et Schofield, 1982). Cependant, Holtze et Hutchinson (1989) croient sous-estimer la sensibilité des oeufs de Meunier noir s'ils comparent leurs données avec celles d'autres auteurs. Trojnar (1977b) a trouvé qu'à pH 4.5, tous les oeufs de Meunier noir sont morts avant l'éclosion dans une eau de faible conductivité (20 $\mu\text{mhos/cm}$) et que dans une eau de 250 $\mu\text{mhos/cm}$, toutes les larves écloses étaient déformées et sont mortes après une courte période de temps.

100% des oeufs soumis à pH 4.5 sont morts 57 heures après la fécondation (Oyen *et al.*, 1991) chez la Carpe. Le taux d'éclosion pour *Cyprinodon n. nevadensis* a été de 15.4% lorsque les oeufs ont été soumis à pH 6.0 durant une heure et de 3.3% lorsque soumis à ce même pH de façon continue (Lee et Gerking, 1977). Un pH de 3.5 a induit une mortalité de 100% des oeufs (Rask, 1984) chez la

Perchaude. Holtze et Hutchinson (1989) ont observé une mortalité de 50% après quatre jours d'exposition à pH 4.62 pour le Grand Corégone, *Coregonus clupeaformis* et 4.86 pour le Méné à nageoires rouges, *Notropis cornutus*. Pour les mêmes espèces, des pH de 4.2 et 4.8 ont tué tous les oeufs avant qu'ils aient atteint le stade oeillé. Chez le Doré jaune, *Stizostedion vitreum*, un pH de 5.4 a induit une mortalité de 90.5% lorsque les individus y ont été soumis de la fertilisation de l'oeuf jusqu'au stade oeillé (Hulsman *et al.*, 1983). Dans une autre étude, Holtze et Hutchinson, (1989) ont observé 50% de mortalité à pH 4.86 pendant les jours quatre à 23.

1.2.1.3 Effet d'un pH acide sur les oeufs oeillés

Le stade d'oeuf oeillé est habituellement plus tolérant à des pH acides que l'oeuf fraîchement fertilisé. Un pH plus faible devra être utilisé pour obtenir un taux de mortalité similaire à celui obtenu au stade d'oeuf fraîchement fertilisé. Ainsi, chez la Truite brune, Sadler et Lyman (1988 in Sayer *et al.*, 1993) ont observé une mortalité de 5% à l'éclosion après exposition des oeufs oeillés à pH 4.5, alors que le même traitement sur les oeufs fraîchement fertilisés a entraîné une mortalité de 88% (Sayer *et al.*, 1993). Roubough (1982) a trouvé une mortalité de 50% à pH 3.6 - 4.0 pour le stade d'oeuf oeillé chez différentes espèces de Saumons du Pacifique à une température de 10°C. Une expérience à pH 4.5 a diminué significativement la survie des oeufs oeillés de la Truite dorée (DeLonay *et al.*, 1993). L'Ombre de fontaine connaît une mortalité significative lorsque les oeufs oeillés sont incubés 30 jours à pH 4.5 (Cleveland *et al.*, 1986). Un pH de 4.0 a causé une mortalité de 97% des oeufs oeillés chez le Saumon atlantique (Peterson *et al.*, 1980), mais Daye et Garside (1977) notent une limite inférieure de létalité de pH 3.0 - 3.1, lorsque les oeufs sont soumis à ce pH juste avant l'éclosion. Ces auteurs ont observé 100% de

mortalité après deux jours d'exposition à pH 2.9. Holtze et Hutchinson (1989) ont observé une mortalité moins de 50% à pH ≥ 4.2 pour le Meunier noir, le Doré jaune, le Grand Corégone, l'Achigan à petite bouche, *Micropterus dolomieu* et l'Achigan à grande bouche, *Micropterus salmoides* pour une durée de quatre jours débutant au stade d'oeuf oeilé. Le temps d'éclosion peut aussi être modifié par des pH acides (Hurley *et al.*, 1989; Ingersoll *et al.*, 1990), qui causeraient une inhibition de la chorionase, une enzyme de l'éclosion (Peterson *et al.*, 1980).

1.2.1.4 Effet d'un pH acide sur les larves vésiculées

De façon générale, le stade de larve vésiculée est l'un des plus sensibles chez les poissons. L'effet de l'acidité peut donc être très marqué pendant cette période. En effet, Jagoe *et al.* (1984) ont obtenu une mortalité totale en soumettant des larves vésiculées d'Omble de fontaine à pH 4.0 pendant 28 heures. Selon Daye et Garside (1977), un pH de 4.0 serait la limite de tolérance inférieure pour les larves vésiculées du Saumon atlantique âgées de sept et 28 jours. En effet, un pH de 3.5 a causé 100% de mortalité chez les larves vésiculées âgées de sept jours et un pH de 3.7 a suffi pour tuer l'ensemble des larves âgées de 28 jours. Lors d'une étude en milieu naturel, Hulsman *et al.* (1983) ont noté une mortalité quasi totale en exposant des larves vésiculées de Truite arc-en-ciel à pH 4.6 pendant trois jours et pH 5.4 pendant cinq jours. Ils ont cependant observé une très bonne survie à pH 5.5. Selon ces auteurs, la variation de la mortalité entre les pH 5.4 et 5.5 serait probablement causée par d'autres facteurs environnementaux. Enfin, selon Baker et Schofield (1982), le Meunier noir ne pourrait survivre à des pH < 5.0 au stade larvaire.

Sayer *et al.* (1993) suggèrent qu'une préexposition à des pH faibles augmenterait la mortalité larvaire. Ainsi, pour l'Omble de fontaine soumis à pH 4.5,

on observe une mortalité et un taux de difformité plus élevés chez les larves vésiculées ayant subi l'acidité dès le stade d'oeuf oeillé (Cleveland *et al.*, 1986). L'étude d'Ingersoll *et al.* (1990) démontre sensiblement les mêmes résultats avec des ombles ayant subi un pH de 4.0, 21 jours avant l'éclosion et qui ont été maintenus par la suite à pH 6.5. La mortalité de ces larves vésiculées atteignait alors 100%. La Truite dorée voit son espérance de vie diminuer fortement à pH 4.5 lors du passage du stade oeillé à la larve vésiculée (DeLonay *et al.*, 1993). Un pH de 5.2 doit être utilisé pour occasionner 100% de mortalité à des larves vésiculées de Tête-de-boule, *Pimephales promelas*, ayant subi les mêmes conditions durant leur incubation. Par contre, un pH de 5.5 est suffisant pour détruire les larves vésiculées de cette même espèce, si aucun traitement préalable n'a été effectué (McCormick *et al.*, 1989). Toutes les espèces ne réagissent cependant pas de la même manière. Ainsi, Holtze et Hutchinson (1989) ont trouvé que la sensibilité des larves vésiculées est plus grande lorsque le traitement débute après l'éclosion. Ils ont observé une mortalité de 94.3% pour le Meunier noir à pH 4.5, lorsque le traitement débute après l'éclosion et se poursuit durant quatre jours. Rask (1984) est venu à la même conclusion avec une étude sur la Perchaude. Il a observé une meilleure résistance des larves ayant subi un choc acide tout au long de la période précédant l'éclosion et le début du stade de larve vésiculée. L'Achigan à petite bouche, soumis à pH 5.1, 5.7 et 7.3, n'a pas montré de différence dans la mortalité lorsque les individus furent exposés à ces pH à partir du stade de larve vésiculée (Kane et Rabeni, 1987). Enfin, on peut noter que la croissance larvaire de l'Ombre de fontaine est ralentie à pH 4.5 et moins (Menendez, 1976; Jordahl et Benson, 1987; Mount *et al.*, 1988; Cleveland *et al.*, 1991). Ce ralentissement du taux de croissance risque de diminuer les chances de survie des individus car un

développement et une croissance rapides sont nécessaires pour les jeunes stades de poissons en milieux froids (DeLonay *et al.*, 1993).

1.2.2 Facteurs influençant la sensibilité des jeunes stades de poissons à un pH acide

Divers facteurs internes reliés à l'organisme peuvent influencer sa sensibilité à un stress chimique. Plusieurs facteurs externes (environnementaux) peuvent aussi agir sur la toxicité d'un composé. Un autre point primordial dans l'explication de la variation des résultats est le déroulement des expériences et l'analyse des résultats (Roubough, 1982), qui seront revus dans la présente section.

1.2.2.1 Sensibilité et facteurs internes reliés à l'organisme

Pour une même espèce, la tolérance à l'acidité est souvent très différente d'un stade à l'autre. Cette variation est attribuable aux changements durant le cycle vital de l'individu qui le rend plus ou moins vulnérable aux conditions du milieu.

Certains auteurs ont tendance à généraliser le fait que la sensibilité d'un poisson aux pH acides diminue avec l'âge (Baker et Schofield, 1982; Rask, 1984; Ingersoll *et al.*, 1990). En fait, le stade d'oeuf oeillé semble être plus tolérant que le stade larvaire, bien qu'il précède ce dernier. La sensibilité de l'embryon diminuerait à partir de la fertilisation (oeuf fraîchement fertilisé) jusqu'au moment de l'éclosion (larve vésiculée) où elle augmenterait de nouveau (Daye et Garside, 1977; Roubough, 1982; Hulsman *et al.*, 1983; Brown et Sadler, 1989; Holtze et Hutchinson, 1989; Oyen *et al.*, 1991). Ce phénomène serait lié à la protection qu'offre le chorion de l'oeuf et le liquide périvitellin à l'embryon oeillé (Lee et Gerking, 1977; Roubough, 1982; Siddens *et al.*, 1984). Cette protection semble également augmenter avec le temps jusqu'à l'éclosion. La tolérance aux pH acides

diminue encore durant le stade larvaire pour ensuite augmenter de nouveau au stade adulte.

Chaque espèce diffère par sa morphologie, sa physiologie, son comportement et sa distribution. Roubough (1982) attribue les différences de sensibilité au pH à la capacité propre de chaque espèce de tamponner l'acidité ou l'alcalinité avec le liquide périvitellin du stade oëillé. Au stade larvaire, la sensibilité serait fonction de la capacité physiologique de chaque espèce à tolérer un stress. La capacité de régulation ionique et osmotique joue également un rôle dans la sensibilité d'une espèce. Une espèce a donc ses propres réponses aux différentes conditions. Ainsi le Meunier noir serait plus sensible que l'Omble de fontaine à un stress acide (Baker et Schofield, 1982). Les oeufs de la Carpe seraient aussi plus fragiles que les oeufs de Salmonidés (Oyen *et al.*, 1991). Holtze et Hutchinson (1989) ont remarqué que les oeufs de Doré jaune ont une sensibilité intermédiaire entre celles du Méné à nageoires rouges et du Meunier noir.

On peut observer des différences de sensibilité à l'intérieur de la même famille ou du même genre. Selon Roubough (1982), l'étendue des pH causant une mortalité significative chez les embryons et les larves de plusieurs espèces de Salmonidés est souvent très large et la sensibilité varie selon l'espèce et le stade pour un même genre. Par exemple, au stade oëillé, le Saumon chinook est plus sensible que le Saumon coho mais au stade de larve vésiculée, le coho est plus sensible que le chinook (Roubough, 1982). À l'aide de résultats publiés par d'autres auteurs, Roubough (1982) classe également d'autres espèces de Salmonidés en ordre décroissant de sensibilité: Truite arc-en-ciel, Touladi (*Salvelinus namaycush*), Saumon atlantique, Truite brune et Omble de fontaine.

Pour une même espèce, il peut aussi y avoir des différences de sensibilité liées aux variations génétiques. Rask (1984) a trouvé une différence dans le temps de

développement de deux populations de Perchaude à pH 4.0, ainsi qu'au niveau de la mortalité durant les premiers stades de développement (oeufs). Hurley *et al.* (1989) ont également observé des différences de sensibilité chez les jeunes stades pour différentes lignées d'Omble de fontaine. En effet, Sayer *et al.* (1993) font une mise en garde face à l'origine des individus utilisés dans les expériences en laboratoire et le lieu où des paramètres sont estimés sur le terrain. La sensibilité d'un organisme ne serait pas seulement reliée à l'espèce, mais aussi à l'hérédité (Daye et Garside, 1977).

Un facteur pouvant altérer la survie des jeunes stades de poissons est aussi l'exposition des géniteurs à un faible pH avant et durant la ponte. Lee et Gerking (1977) ont suggéré que l'ovogenèse chez *Cyprinodon n. nevadensis* peut être affectée en conditions acides, ce qui aurait une influence sur l'éclosion. Pour l'Omble de fontaine, Menendez (1976) a observé une baisse significative du nombre d'oeufs viables provenant de géniteurs exposés à pH 5.0 durant cinq mois avant la reproduction.

Le métabolisme et l'état physique d'un organisme sont aussi des facteurs pouvant jouer un rôle sur la sensibilité dans un test de toxicité (Rand et Petrocelli, 1985). Ils font partie des facteurs internes agissant sur la tolérance d'un organisme à des agents de contrôle.

1.2.2.2 Effet de l'aluminium en conditions acides

L'aluminium et le pH de l'eau sont des paramètres intimement liés dans les causes de mortalité en milieux acides, chez les jeunes stades de développement des poissons. L'aluminium a des effets antagonistes en conditions acides, car son effet sur les jeunes stades de poissons peut être néfaste ou bénéfique. Cet effet dépendra principalement du stade du cycle vital et du pH. L'aluminium est

naturellement présent dans le milieu aquatique, mais les formes inorganiques monomériques (Al^{3+} , $\text{Al}(\text{OH})_2^+$, $\text{Al}(\text{OH})_4^-$) semblent avoir un effet plus important que les autres formes (Driscoll *et al.*, 1980; Fiss et Carline, 1993). L'aluminium disponible est généralement plus élevé en milieu acide et sa concentration augmente durant les pluies et les fontes de neige qui abaissent le pH d'un plan d'eau. Cette augmentation aura des effets néfastes sur le recrutement de plusieurs populations de poissons. Chaque composé d'aluminium a ses propres influences. L'aluminium inorganique labile semble cependant être déterminant pour la survie des organismes aquatiques (Brown et Sadler, 1989). Il est important de noter que d'autres éléments présents dans l'eau peuvent agir sur la toxicité en milieu acide et sur l'aluminium. Plusieurs métaux toxiques traces (As, Cd, Co, Fe, Hg, Mn, Pb et Zn) sont également en plus grande concentration en eaux acides (Sayer *et al.*, 1993). L'aluminium semble cependant être l'élément le plus nocif causant la mortalité chez les jeunes stades.

Holtze et Hutchinson (1989) ont observé une variation de la toxicité de l'aluminium qui est fonction de sa concentration, du stade de développement, de la durée de l'exposition et du pH. Ainsi, ils ont observé que l'aluminium est bénéfique à la survie des oeufs fraîchement fertilisés à pH 4.2-4.5 pour de courtes périodes d'exposition. Chaque espèce semble avoir ses propres réponses à l'aluminium et au pH. Par exemple, les oeufs de Meunier noir ont une survie de 1% après six jours à pH 5.5 (sans aluminium), mais une survie de 74,6% à une concentration de 300 $\mu\text{g/l}$ d'aluminium, au même pH. Ce phénomène d'augmentation de la tolérance des oeufs à l'acidité en présence d'aluminium a été observé par plusieurs auteurs (Baker et Schofield, 1982; McCormick *et al.*, 1989; Ingersoll *et al.*, 1990). Il est possible que la perméabilité du chorion dépende des cations polyvalents, ce qui expliquerait l'effet "bénéfique" de l'aluminium sur les oeufs (Baker et Schofield, 1982). Une

hypothèse complémentaire est suggérée par McCormick *et al.* (1989): l'aluminium, à des concentrations non toxiques, aurait un effet bénéfique lorsque la concentration en calcium est faible, en procurant des cations polyvalents aidant au contrôle de la perméabilité membranaire. Cet effet de l'aluminium sur les oeufs n'a pas été observé par Cleveland *et al.* (1986) dans leur expérience avec l'Omble de fontaine. Baker et Schofield (1982) ont remarqué eux aussi que l'aluminium augmente la survie des oeufs à pH 4.4, mais qu'il a un impact négatif sur la survie à pH 5.2 et 5.5.

L'aluminium semble avoir des effets néfastes sur des stades plus avancés que l'oeuf fraîchement fertilisé et oeillé. Les larves vésiculées, à partir de l'éclosion, semblent sensibles à l'aluminium. Une mortalité plus grande est observée chez les stades larvaires et les suivants lorsque l'aluminium est présent (Baker et Schofield, 1982; Cleveland *et al.*, 1986; Kane et Rabeni, 1987; Ingersoll *et al.*, 1990). De plus, ces auteurs affirment qu'après le stade oeuf, la toxicité de l'aluminium augmente avec l'âge du poisson. Baker et Schofield (1982) vont plus loin et concluent que plus l'organisme est sensible à un faible pH, plus l'effet de l'aluminium se fera sentir avec une diminution de pH. Ces auteurs n'incluent cependant pas les stades d'oeuf fraîchement fertilisé et oeillé et ils basent leur interprétation sur des résultats obtenus avec le Meunier noir et l'Omble de fontaine. Wood *et al.* (1990) ont observé qu'à des pH acides et en présence d'aluminium, l'Omble de fontaine avait des concentrations d'électrolytes modifiées. Chez le Saumon atlantique, une courbature du corps est observée dans les mêmes conditions (Daye et Garside, 1977).

L'aluminium peut donc modérer les effets des pH acides sur le stade d'oeuf surtout lorsque les concentrations en calcium sont faibles. Par contre, l'aluminium augmente l'effet des pH faibles, augmentant la mortalité larvaire, même lorsque les

concentrations en calcium sont faibles. De plus, cet effet augmenterait du stade larvaire jusqu'au stade juvénile. Même si l'aluminium agit sur la sensibilité des jeunes stades, c'est l'aluminium inorganique labile qui joue un rôle important et des mesures d'aluminium total peuvent compliquer l'interprétation des résultats. Enfin, l'aluminium peut aussi voir sa toxicité diminuer. Driscoll *et al.* (1980) ont observé que le citrate se combine avec l'aluminium et élimine par le fait même sa toxicité sur les larves d'Omble de fontaine.

1.2.2.3 Effet du calcium en conditions acides

En général, les auteurs s'entendent sur le fait qu'une eau contenant plus de calcium augmenterait la survie des jeunes stades de poissons dans les milieux acides (Trojnar, 1977b; Baker et Schofield, 1982; ; Ingersoll *et al.*, 1990; Cleveland *et al.*, 1991) et que l'aluminium cause une mortalité plus grande sur le stade larvaire en condition de faible concentration de calcium (Cleveland *et al.*, 1991).

1.2.2.4 Effet d'autres facteurs en conditions acides

L'aluminium et le calcium ne sont pas les deux seuls éléments à avoir un effet positif ou négatif sur la survie des jeunes stades en milieux acides. D'autres éléments et composés pourraient avoir un effet, mais leur importance n'a pas encore été signalée. Une baisse importante du pH peut contribuer à la dissolution de métaux présents dans le substrat et agir sur la sensibilité des organismes qui sont présents. Par exemple, le fer est toxique à de faibles pH chez le Danio zébré, *Brachydanio rerio* (Dave, 1985). Les facteurs physico-chimiques de l'eau ont probablement eux aussi un effet sur la tolérance des organismes au pH et à l'aluminium, Cleveland *et al.*, 1991. L'étude de Trojnar (1977b) appuie cette constatation, car la dureté de l'eau influencerait la survie jusqu'au stade de nage

vers le haut (angl.: swim-up). Il semble y avoir un plus grand taux de survie dans une eau de conductivité élevée. La température peut aussi avoir un effet sur la sensibilité d'un stade à des pH acides. Peu de recherches ont été faites sur ce sujet, mais Roubough (1982) remarque une plus grande sensibilité des embryons de différentes espèces de Saumon de la région du Pacifique lorsque les individus sont incubés à 5°C mais testés à 10°C, comparativement à une incubation à 10°C et testés à la même température. La matière organique en suspension a un rôle important dans la toxicité de l'aluminium (Backes et Tipping, 1987; Petersen et Persson, 1987). Les interactions aluminium - matière organique et leur rôle dans la survie des poissons sont cependant peu connus.

1.2.3 Facteurs influençant la sensibilité des jeunes stades de poissons à un pH basique

Il existe peu de travaux traitant de l'effet d'un pH basique sur les jeunes stades de poissons. Si des pH acides diminuent la survie des jeunes stades de poissons, il serait réaliste de croire qu'un pH à l'autre extrémité de l'échelle pourrait aussi engendrer une mortalité plus élevée qu'à des pH se rapprochant de la neutralité (pH ≈ 7).

Bergerhouse (1992) a observé une mortalité significative pour des larves âgées de trois jours à pH 10.0 et 10.3 chez le Doré jaune. La mortalité était cependant nulle à pH 9.8. Ce même auteur a remarqué que la toxicité des pH basiques augmente avec l'âge de la larve. Le développement des branchies pourrait en effet augmenter la sensibilité chez les larves plus âgées à des pH basiques. Bergerhouse (1992) a également observé que l'ammoniaque non-ionisée (NH_3^-) augmenterait la toxicité des pH basiques chez les larves de cette espèce. La Truite arc-en-ciel adulte est aussi affectée par des pH élevés. Witschi et Ziebell (1979) ont observé

une mortalité de 100% à pH 10.0 pour une exposition de 48 heures. De plus, les individus exposés à pH 9.0 ont perdu l'équilibre après 4.5 heures seulement. D'un autre côté, Daye et Garside (1980a) n'ont pas observé d'effet à pH 9.0 et 9.5 sur les embryons du Saumon atlantique.

2. MATÉRIEL ET MÉTHODES

2.1 Expériences en laboratoire

2.1.1 Gamètes

Les géniteurs ont été capturés à l'aide d'un verveux dans le tributaire du lac Sans-Nom et le tributaire du lac Mastigou, Réserve faunique de Mastigouche, Québec (46°40'N, 73°20'O). Les mâles et femelles ont été placés dans deux enclos séparés, et la maturation des gonades a été vérifiée en prélevant les produits sexuels à tous les jours. Nous avons utilisé la méthode de fertilisation à sec en usage au MEF (Guillemette 1986). Un délai de deux heures a été fixé entre la fertilisation et le transport des oeufs jusqu'au site d'incubation et de traitement, afin de laisser durcir les oeufs et réduire ainsi la mortalité.

Afin de vérifier si les résultats étaient reproductibles, les tests ont été effectués à deux reprises. Les produits sexuels de la première expérience en laboratoire (L1) provenaient des géniteurs capturés dans le tributaire du lac Sans-Nom et ceux de la deuxième expérience (L2), provenaient des géniteurs du tributaire du lac Mastigou.

2.1.2 Incubation

L'incubation des oeufs a été faite dans 210 unités d'incubation de 750 ml, à débit continu, construits de contenants rectangulaires en PVC (80mm X 305mm X 51mm). Un débit de 10 ml/min a été maintenu dans chacun des incubateurs à l'aide de perfuseurs médicaux et a permis un renouvellement d'eau d'environ 19 fois/jour, ce qui respecte les recommandations de l'American Society for Testing and Materials (ASTM 1980). Le fond des incubateurs était recouvert d'un substrat artificiel (tapis gazon commercial) pour éviter le contact entre les oeufs et diminuer

la contamination par les champignons. Ce substrat a été retiré lorsque les oeufs ont atteint le stade oillé pour faciliter le décompte et l'observation des individus éclos. Un traitement quotidien au vert de malachite oxalate (25 mg/l pendant une heure) a été fait pour prévenir le développement de champignons sur les oeufs. Ce traitement prophylactique a été arrêté dès le premier signe d'éclosion. Un treillis en nytex (500 μ m), placé au niveau du canal d'évacuation d'eau, empêchait les larves de s'échapper. Un bouchon situé près du fond a été installé sur chaque incubateur pour vidanger l'eau et les solutions durant les traitements. Les oeufs ont été distribués dans les incubateurs à l'aide d'une pipette pasteur dont l'orifice a été agrandi et poli à la flamme. Dix pour cent du nombre total d'oeufs étaient déposés dans un incubateur à la fois, selon un ordre déterminé par tirage aléatoire sans remise. La température de l'eau a été enregistrée quotidiennement de façon systématique (un incubateur par rangée). La photopériode a été maintenue à 15:9 (équivalente à celle observée en nature à cette période du cycle vital). L'intensité lumineuse était de 32 lux au niveau des incubateurs.

2.1.3 Eau d'incubation

L'incubation des oeufs a été effectuée dans l'eau de l'aqueduc municipal de la ville de Trois-Rivières. Cette eau a été déchlorée à l'aide d'un filtre au charbon activé et stérilisée à l'aide d'un filtre ultraviolet. L'eau a séjourné par la suite plusieurs heures dans un bassin de conditionnement afin de la traiter contre la sursaturation en gaz, à l'aide d'une aération vigoureuse, et de stabiliser sa température. L'eau atteignait par la suite le réservoir de distribution, constitué d'un baril en polyéthylène de 60 litres muni d'un régulateur de niveau et d'un filtre ultraviolet, où elle était de nouveau aérée. Le réservoir était percé à sa base et relié à 105 tuyaux (4mm de diamètre) qui conduisaient l'eau vers chaque incubateur. La

température, l'oxygène dissous et le pH de l'eau d'incubation ont été enregistrés quotidiennement dans le réservoir de distribution à l'aide d'une sonde hydrolab (modèle Surveyor II). L'alcalinité (par titration potentiométrique) et la dureté (par titration avec EDTA) de l'eau d'incubation ont été mesurées deux fois par semaine selon les méthodes prescrites dans *Standard methods for the examination of water and wastewater* (1980).

2.1.4 Traitements

Les deux expériences se sont déroulées au printemps 1993. Le traitement sur les oeufs fraîchement fertilisés a été fait aussitôt que possible après l'incubation des oeufs dans les incubateurs (environ 24 heures après la fertilisation). Le traitement des oeufs oeillés a été fait lorsque environ 99% des individus étaient rendus à ce stade et celui des larves vésiculées lorsque environ 95% des individus avaient atteint ce stade. Les traitements ont consisté à soumettre les trois stades de développement aux pH suivants: 2.5; 3.0; 3.5; 7.0; 10.5; 11.0 et 11.5. Cinq réplicats ont été effectués pour chacun des traitements. Le choix des incubateurs à traiter a été effectué aléatoirement par tirage sans remise.

Les solutions acides ont été préparées avec de l'acide sulfurique (H_2SO_4) et les solutions basiques avec de l'hydroxyde de calcium ($\text{Ca}(\text{OH})_2$). Elles ont été préparées et aérées 24 heures avant les traitements afin de les saturer en oxygène et de permettre à l'excès de gaz carbonique (CO_2) de s'échapper des solutions acides (Oyen *et al.*, 1991). La température des solutions était la même que celle de l'incubation. Les traitements consistaient d'abord à abaisser le niveau d'eau des incubateurs en prenant soin de garder les sujets immergés. Les solutions acides, neutres et basiques, préparées en fonction du volume résiduel, étaient ensuite introduites dans les incubateurs pour une durée de cinq minutes. Un échantillon

d'eau était alors prélevé dans l'un des cinq réplicats pour obtenir le pH réel du traitement. Après ce laps de temps, le pH était neutralisé par deux rinçages successifs à l'eau d'incubation (voir section 2.1.3), puis les incubateurs étaient remplis à nouveau avec de l'eau d'incubation.

2.1.5 Observations et prise des données

La mortalité a été notée à toutes les 24 heures à partir du début des expériences L1 et L2. L'oeuf était considéré mort lorsqu'il était opaque, la larve lorsqu'il n'y avait plus de mouvement et lorsqu'il y avait décoloration de l'individu. Les individus morts ont été enlevés et conservés dans la formaline 5%. Les larves qui ont atteint le stade de «nage vers le haut» (angl.: swim-up) ont été prélevées, euthanasiées au sel de méthanosulfonate (MS-222) et fixées à la formaline 5%. Le développement des individus a été suivi pour l'expérience L2 à partir du neuvième jour selon les critères suivants: pourcentage d'individus ayant atteint le stade oeillé, pourcentage de larves vésiculées et pourcentage de larves au stade de nage vers le haut.

2.2 Expériences en milieu semi-naturel

2.2.1 Gamètes

Les produits sexuels ont été prélevés de façon identique à ceux des expériences en laboratoire (voir section 2.1.1). Les produits sexuels utilisés pour la première expérience en milieu semi-naturel (T1) provenaient des géniteurs capturés dans le tributaire du lac Sans-nom et ceux de la deuxième expérience (T2), provenaient des géniteurs du tributaire du lac Mastigou.

2.2.2 Incubation

L'incubation a été identique à celle effectuée en laboratoire (voir section 2.1.2), mis à part le débit qui était de 150 ml/min (renouvellement d'eau de 285 fois/jour) et le nytex qui était de 1000 μ m, pour diminuer le colmatage par les fines particules présentes dans l'eau d'incubation. De plus, il n'y avait pas de traitement antifongique, afin de respecter au maximum les conditions retrouvées en nature.

2.2.3 Eau d'incubation

L'eau servant à l'alimentation des incubateurs provenait de la rivière du Loup au niveau de l'accueil Pins Rouges de la réserve faunique de Mastigouche (Québec). Elle était acheminée au dispositif expérimental à l'aide de pompes submersibles. Un groupe électrogène était prévu en cas de panne électrique. Afin de diminuer au maximum la sédimentation dans les incubateurs, l'eau d'incubation traversait un filtre en nytex de 500 μ m avant d'être acheminée aux deux réservoirs de distribution.

2.2.4 Traitements

Les tests en milieu semi-naturel ont été faits au printemps 1993. Les traitements ont été semblables à ceux effectués en laboratoire (voir section 2.1.4) à l'exception du passage des solutions acides et basiques sur un substrat composé de gravier provenant de la rivière du Loup. Cette pratique avait pour but de simuler les interactions probables entre l'eau et les sédiments (le changement de pH de l'eau peut causer la solubilisation de certains métaux contenus dans les sédiments; Jeffries *et al.*, 1979; Driscoll *et al.*, 1980). Un échantillon d'eau a été prélevé dans les solutions pour mesurer les concentrations de certains éléments (Al, Mn, Fe, Ca, Mg, Na, K, Cu, Zn, Ni, Co, Ba, B, Cd, Pb, Be, Mo et V). Le dosage de ces

éléments a permis d'identifier ceux qui ont été solubilisés des sédiments et ayant possiblement un effet sur la sensibilité des individus.

2.3 Analyses statistiques

Les pourcentages de mortalité ont été calculés à partir du nombre d'individus vivants au jour du traitement. Le pourcentage de développement a été calculé à partir du nombre d'individus rendus au stade d'oeuf oeillé, de larve vésiculée ou de larve au stade de nage vers le haut. Les pourcentages de mortalité et de développement ont préalablement été transformés à l'aide d'une fonction arcsinus selon les recommandations de Sokal et Rolf (1981) pour les pourcentages. Les données répondant à l'homogénéité des variances par le test de Fmax ont été analysées avec une analyse de variance (ANOVA), suivi d'un test de comparaisons multiples de Fisher sur les données transformées. Les données ne répondant pas à l'homogénéité des variances ont été analysées à l'aide du test de Kruskal-Wallis.

3. RÉSULTATS

3.1 Nombre d'individus soumis aux traitements

Le nombre d'individus incubés au début des expériences a été établi à partir de la somme des mortalités, des individus qui se sont rendus au stade de nage vers le haut et des individus toujours vivants à la fin de l'expérience. Le nombre moyen d'individus par incubateur a varié de 90 à 137 selon l'expérience (Tableau 1). Les pourcentages de mortalité ont été calculés à partir du nombre réel compilé pour chaque incubateur.

3.2 Physico-chimie de l'eau d'incubation

La température de l'eau d'incubation en laboratoire est demeurée relativement constante tout au long de l'expérience, fluctuant de 15.0°C à 17.7°C (Tableau 2). La température d'incubation en milieu semi-naturel a augmenté graduellement avec le temps. Elle a varié de 11°C à 19°C pour l'expérience T1 et est passée de 12°C à 20°C pour l'expérience T2 (Tableau 2). La concentration d'oxygène dissous s'est toujours maintenue à plus de 90% de saturation et ce, pour l'ensemble des expériences (Tableau 2).

Une baisse importante du pH est survenue dans l'eau d'incubation pendant l'expérience L1. En effet, le pH de l'eau est passé de 7.07 à 4.67 du jour un au jour trois et est remonté à 7.03 au jour quatre. Cette baisse importante du pH a été causée par l'ajout de bisulfite de sodium (NaHSO_3) pour traiter l'eau contre le chlore résiduel (ASTM, 1980). Suite à cette constatation, le thiosulfate de sodium ($\text{Na}_2\text{S}_2\text{O}_3$) a été utilisé pour continuer à déchlorer l'eau tout en maintenant un pH près de la neutralité. La conductivité, la dureté et l'alcalinité de l'eau d'incubation en laboratoire (L1 et L2) étaient supérieures à celle de l'eau d'incubation en milieu

Tableau 1: Nombre moyen d'oeufs par incubateur \pm 1 É.-T. au début des expériences; expériences en laboratoire (L1 et L2), expériences en milieu semi-naturel (T1 et T2), minimum et maximum entre parenthèses. Le nombre d'oeufs par incubateur est égal à la somme des individus morts, des individus qui se sont rendus au stade de nage vers le haut et des individus toujours vivants à la fin de l'expérience.

Expérience	Nombre d'oeufs/incubateur
Laboratoire	
L1	90 \pm 17 (50-154)
L2	95 \pm 12 (59-129)
Semi-naturel	
T1	137 \pm 16 (74-192)
T2	98 \pm 8 (70-120)

Tableau 2: Physico-chimie de l'eau d'incubation; valeurs moyennes ± 1 É.-T., minimum et maximum entre parenthèses et nombre de mesures. Expériences en laboratoire (L1 et L2) et en milieu semi-naturel (T1 et T2).

Expérience	Eau d'incubation					
	Température d'incubation (°C)	Oxygène dissous (mg/L)	pH	Conductivité (μ S/cm)	Dureté (mg/L de CaCO ₃)	Alcalinité (mg/L de CaCO ₃)
Laboratoire						
L1	16.5 \pm 0.5 (15.5-17.7) 270	9.29 \pm 0.21 (8.85-9.72) 26	6.97 \pm 0.49 (4.67-7.32) 26	71	17.15 \pm 1.49 (14.21-19.41) 11	7.10 \pm 2.93 (0.00-9.12) 11
L2	16.2 \pm 0.5 (15.0-17.7) 310	9.46 \pm 0.30 (8.78-10.22) 28	6.91 \pm 0.26 (6.40-7.28) 29	69	18.43 \pm 2.29 (15.84-22.94) 9	8.65 \pm 0.78 (7.00-9.54) 9
Semi-naturel						
T1	12.7 \pm 2.0 (11.0-19.0) 119	10.13 \pm 0.70 (8.00-11.00) 21	6.57 \pm 0.22 (6.20-6.89) 20	25	9.77 \pm 1.17 (8.24-11.33) 7	3.14 \pm 0.78 (2.40-4.80) 7
T2	14.9 \pm 3.0 (12.0-20.0) 38	9.28 \pm 0.21 (7.80-10.80) 12	6.54 \pm 0.14 (6.21-6.96) 9	29	9.40 \pm 0.85 (8.62-10.30) 3	3.47 \pm 0.92 (2.40-4.00) 3

semi-naturel (T1 et T2) (Tableau 2). Cependant, l'eau d'incubation des quatre expériences était relativement comparable d'un point de vue physico-chimique et présentait les caractéristiques d'une eau douce (Wetzel, 1983).

3.3 pH effectif des traitements

Même si le pH mesuré durant les traitements était très près du pH visé (annexe 1), les valeurs de pH théoriques ont été utilisées dans ce document afin d'alléger la description des résultats et la discussion.

3.4 Concentration des éléments analysés dans les solutions de traitement en milieu semi-naturel

La liste des éléments analysés dans les solutions de traitement pour les deux expériences en milieu semi-naturel se retrouvent à l'annexe 2 et les valeurs aux annexes 3 et 4. On remarque que les concentrations d'aluminium (totale et labile), du chrome et du calcium ont généralement augmenté avec le degré d'acidité et d'alcalinité des solutions de traitement (annexes 3 et 4); la concentration de ces éléments a augmenté dans les solutions de pH 7.0 à 2.5 et de pH 7.0 à 11.5. L'augmentation des concentrations de calcium dans les solutions basiques (pH 10.5, 11.0 et 11.5) provenait fort probablement de l'hydroxyde de calcium, utilisé pour ajuster les solutions basiques. La concentration de fer, cuivre, magnésium, zinc et manganèse avait tendance à augmenter avec l'acidité et diminuer dans les solutions basiques (annexes 3 et 4). Le baryum était présent seulement dans les solutions acides alors que les concentrations de sodium et de potassium sont demeurées stables entre les solutions de traitement (annexes 3 et 4). Enfin, les concentrations de nickel, cobalt, bore, cadmium, plomb, béryllium, molybdène et vanadium étaient inférieures aux limites de détection tel que décrites à l'annexe 2.

3.5 Mortalité obtenue après l'application des traitements

La durée d'expérimentation était variable d'une expérience à l'autre, à cause du développement plus ou moins rapide des individus. Les pourcentages de mortalité ont été comparés de façon statistique entre les traitements, 24 heures après l'application du traitement et au dernier jour de l'expérience. La comparaison de la mortalité entre les traitements, tôt après leur application (24 heures), a permis d'identifier les effets aigus, tandis que la comparaison de la mortalité au dernier jour des expériences a permis d'évaluer l'effet des traitements à plus long terme.

3.5.1 Traitement acide sur les oeufs fraîchement fertilisés

Au début des expériences, l'écart observé entre la mortalité à pH 2.5 et les autres traitements (pH 7.0, 3.5 et 3.0) était relativement important, à la fois en laboratoire et en milieu semi-naturel (Figure 1). Cependant, cette différence s'est estompée avec la progression des expériences. En effet, un traitement acide de pH 2.5 a occasionné des mortalités importantes 24 heures après le traitement, variant de 74.6% à 98.5%, alors qu'à pH 7.0, 3.5 et 3.0 la mortalité moyenne était inférieure à 3.2%. Cette différence s'est révélée significative pour les quatre expériences (Tableaux 3 et 4). La mortalité obtenue au dernier jour des expériences était comparable entre les traitements pour les expériences en laboratoire (Tableau 3). Cependant, on note certaines différences entre les traitements en ce qui a trait aux expériences en milieu semi-naturel (Tableau 4).

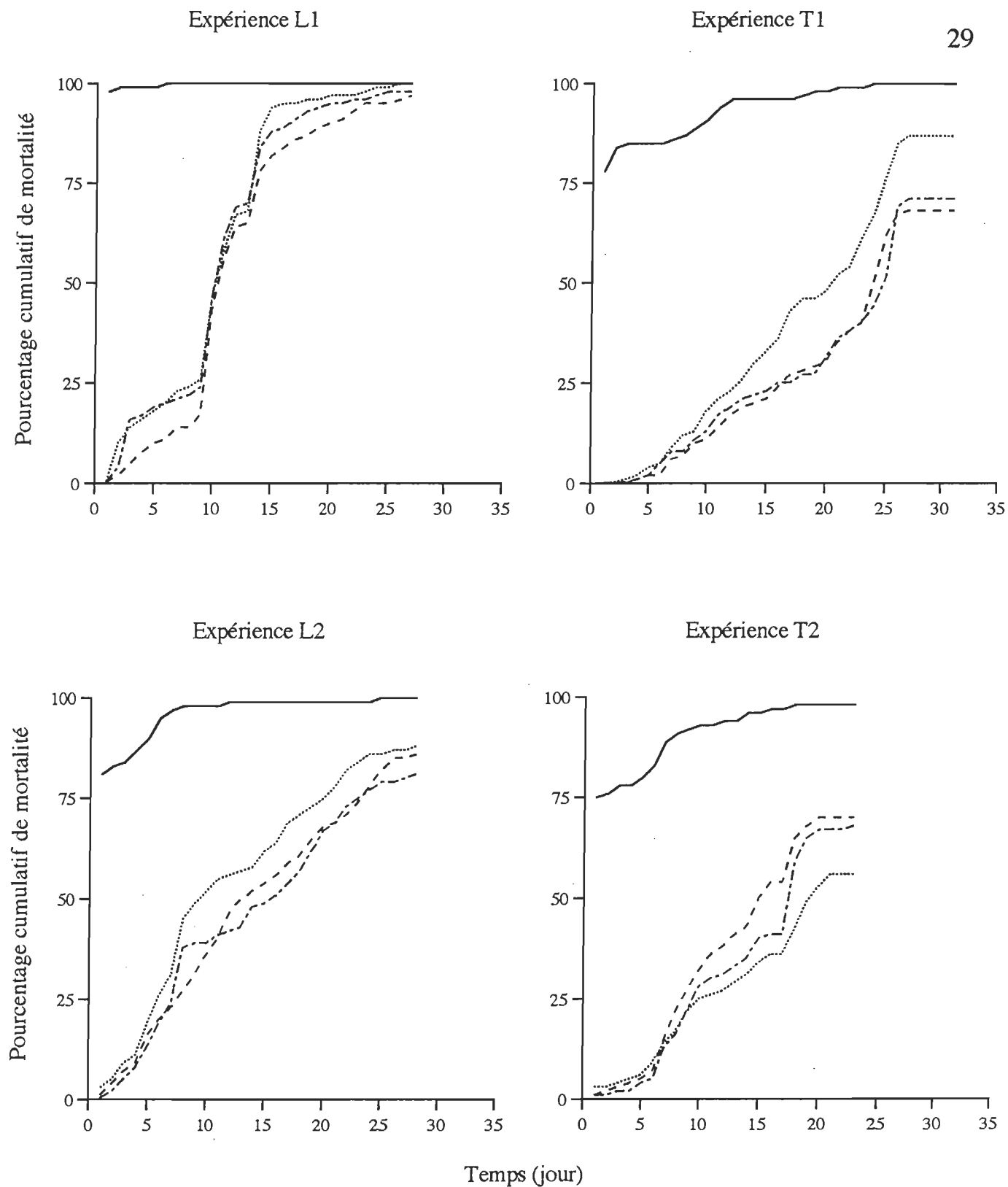


Figure 1: Mortalité cumulative après un traitement acide sur les oeufs fraîchement fertilisés, pour les expériences en laboratoire (L1 et L2) et en milieu semi-naturel (T1 et T2); pH 2.5 — , pH 3.0 , pH 3.5 ---- , pH 7.0 -.-.- .

Tableau 3: Pourcentage moyen de mortalité (± 1 É.-T. entre parenthèses) des oeufs fraîchement fertilisés, 24 heures après un traitement acide et à la fin des expériences en laboratoire (L1 et L2); n = 5 réplicats par traitement.

Traitement	Pourcentage de mortalité	
	Après 24 heures	À la fin
Expérience L1		
pH 2.5	98.5a* (0.7)	100a** (0)
pH 3.0	0.5b (0.7)	99.7a (0.6)
pH 3.5	0.3b (0.8)	96.7a (4.0)
pH 7.0	0.3b (0.6)	98.3a (3.8)
Expérience L2		
pH 2.5	81.2a* (8.4)	99.8a* (0.4)
pH 3.0	3.1b (2.7)	87.7a (16.9)
pH 3.5	0.9b (1.0)	86.4a (12.9)
pH 7.0	0.4b (0.5)	81.1a (31.9)

* Pour une période donnée (24 heures après le traitement ou à la fin de l'expérience), les moyennes accompagnées d'une même lettre ne sont pas significativement différentes, tel que déterminé par une ANOVA suivie d'un test de comparaisons multiples de Fisher.

**Les moyennes accompagnées d'une même lettre ne sont pas significativement différentes, tel que déterminé par un test de Kruskal-Wallis, suivi de comparaisons multiples pour les moyennes démontrant des différences.

Tableau 4: Pourcentage moyen de mortalité (± 1 É.-T. entre parenthèses) des oeufs fraîchement fertilisés, 24 heures après un traitement acide et à la fin des expériences en milieu semi-naturel (T1 et T2); n = 5 réplicats par traitement.

Traitement	Pourcentage de mortalité	
	Après 24 heures	À la fin
Expérience T1		
pH 2.5	78.1a** (0.7)	99.6a** (0.9)
pH 3.0	0b (0)	86.8a (19.2)
pH 3.5	0b (0)	68.4b (28.3)
pH 7.0	0b (0)	71.0b (28.4)
Expérience T2		
pH 2.5	74.6a* (2.8)	97.9a* (2.2)
pH 3.0	2.5b (1.8)	56.3b (13.9)
pH 3.5	0.6b (0.6)	70.5b (23.6)
pH 7.0	0.6b (0.5)	67.7b (28.6)

* Pour une période donnée (24 heures après le traitement ou à la fin de l'expérience), les moyennes accompagnées d'une même lettre ne sont pas significativement différentes, tel que déterminé par une ANOVA suivie d'un test de comparaisons multiples de Fisher.

**Les moyennes accompagnées d'une même lettre ne sont pas significativement différentes, tel que déterminé par un test de Kruskal-Wallis, suivi de comparaisons multiples pour les moyennes démontrant des différences.

3.5.2 Traitement basique sur les oeufs fraîchement fertilisés

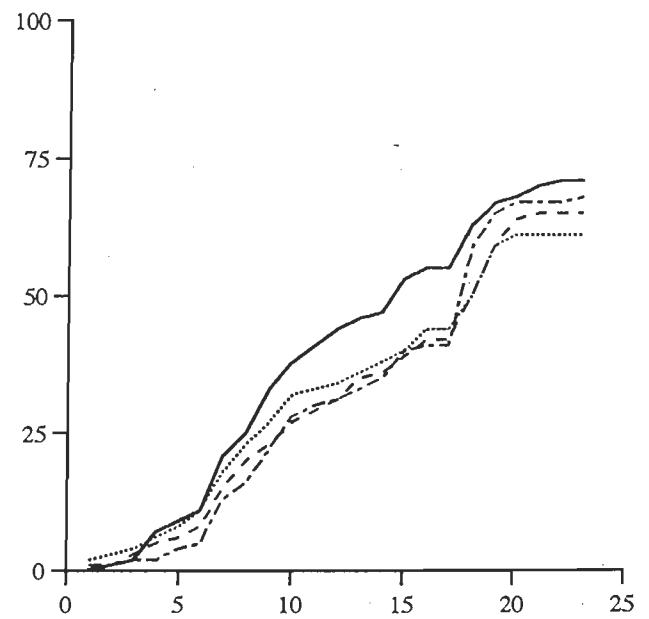
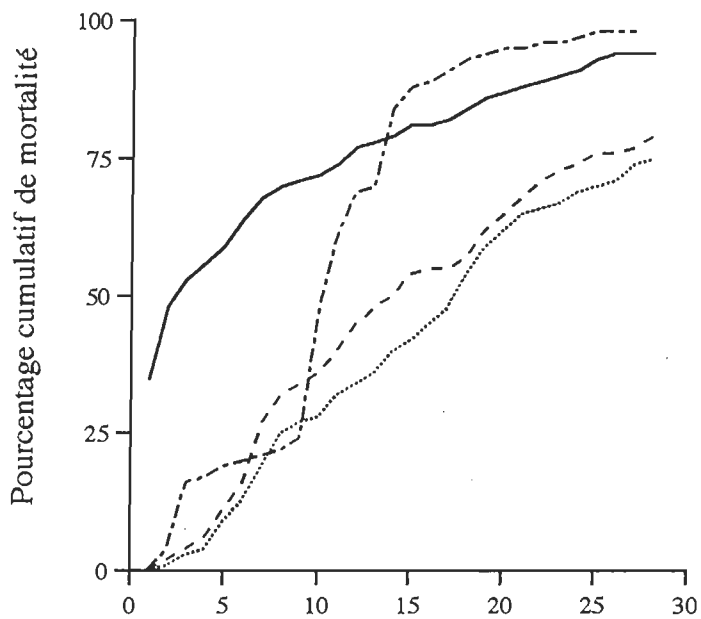
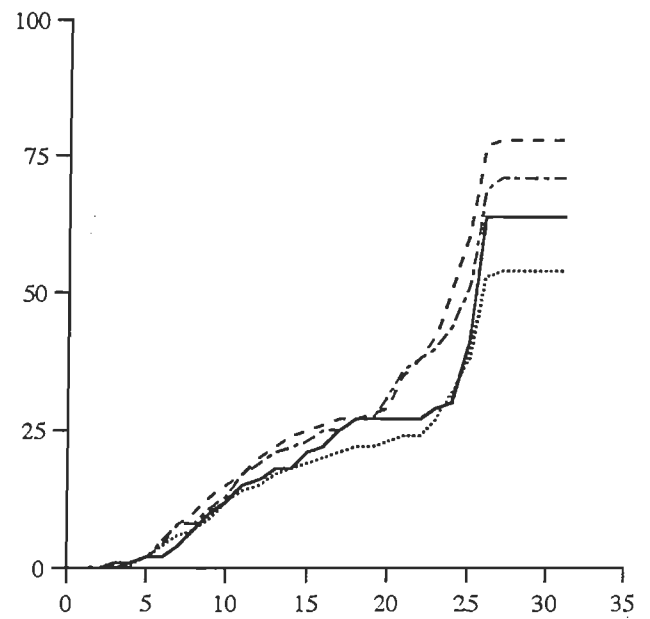
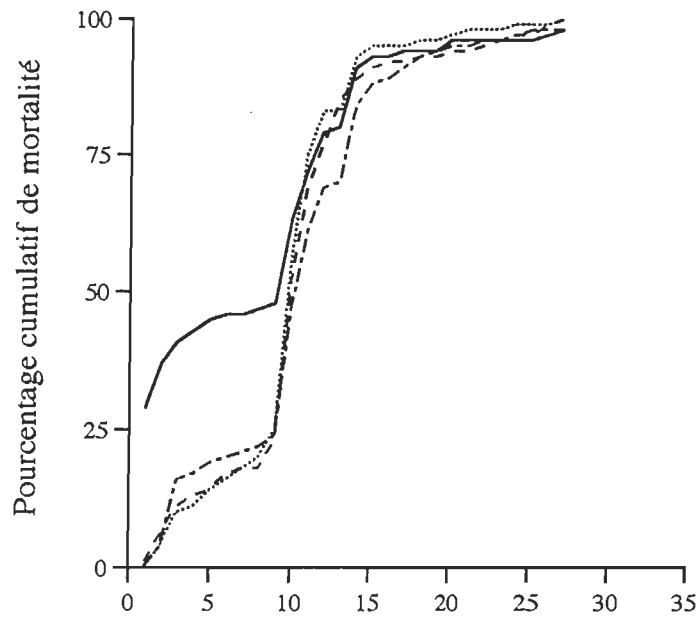
La mortalité moyenne obtenue 24 heures après un traitement de pH 11.5 sur les oeufs fraîchement fertilisés a été moins élevée que celle obtenue à pH 2.5. En laboratoire, un traitement de pH 11.5 a causé 29.3% et 35.3% de mortalité, 24 heures après son application (Figure 2). Pour les deux expériences en laboratoire, la mortalité observée à pH 11.5 était significativement différente des autres traitements basiques (pH 10.5 et 11.0) mais cette différence ne s'est pas maintenue jusqu'à la fin (Tableau 5).

En milieu semi-naturel, la mortalité obtenue 24 heures après les traitements basiques était inférieure à 2% (Figure 2). De plus, contrairement aux résultats obtenus en laboratoire, aucune différence significative n'a été observée entre les traitements, que ce soit au début ou à la fin des expériences (Tableau 6).

3.5.3 Traitement acide sur les oeufs oeillés

Tant au laboratoire qu'en milieu semi-naturel, le stade d'oeuf oeillé a semblé plus tolérant à un traitement de pH 2.5 que le stade d'oeuf fraîchement fertilisé. Vingt-quatre heures après son application, ce traitement a produit une faible mortalité sur les oeufs oeillés (Figure 3). En laboratoire, un traitement de pH 2.5 a causé une mortalité significativement plus élevée qu'aux traitements de pH 7.0, 3.5 et 3.0, 24 heures après le traitement, pour l'expérience L1 seulement (Tableau 7). Cependant, à la fin des expériences, les mortalités obtenues étaient semblables pour tous les traitements (Tableau 7).

En milieu semi-naturel, une erreur logistique a eu lieu durant l'expérience T1. Les incubateurs qui ont reçu un traitement de pH 2.5 au stade oeillé de l'expérience T1 ont reçu un deuxième traitement sept jour après le premier. Donc, la mortalité à pH 2.5 n'a pu être suivie après le septième jour (Figure 3). Les mortalités obtenues



Temps (jour)

Figure 2: Mortalité cumulative après un traitement basique sur les oeufs fraîchement fertilisés, pour les expériences en laboratoire (L1 et L2) et en milieu semi-naturel (T1 et T2); pH 11.5 —, pH 11.0 ·····, pH 10.5 ----, pH 7.0 -.-.-.

Tableau 5: Pourcentage moyen de mortalité (± 1 É.-T. entre parenthèses) des oeufs fraîchement fertilisés, 24 heures après un traitement basique et à la fin des expériences en laboratoire (L1 et L2); n = 5 réplicats par traitement.

Traitement	Pourcentage de mortalité	
	Après 24 heures	À la fin
Expérience L1		
pH 11.5	29.2a** (23.4)	97.8a** (3.2)
pH 11.0	0b (0)	99.7a (0.6)
pH 10.5	0.7b (0.7)	100a (0)
pH 7.0	0.3b (0.6)	98.3a (3.8)
Expérience L2		
pH 11.5	35.3a* (22.8)	94.5a* (5.6)
pH 11.0	0.2b (0.4)	75.3a (29.8)
pH 10.5	0.2b (0.4)	78.9a (25.3)
pH 7.0	0.4b (0.5)	81.1a (31.9)

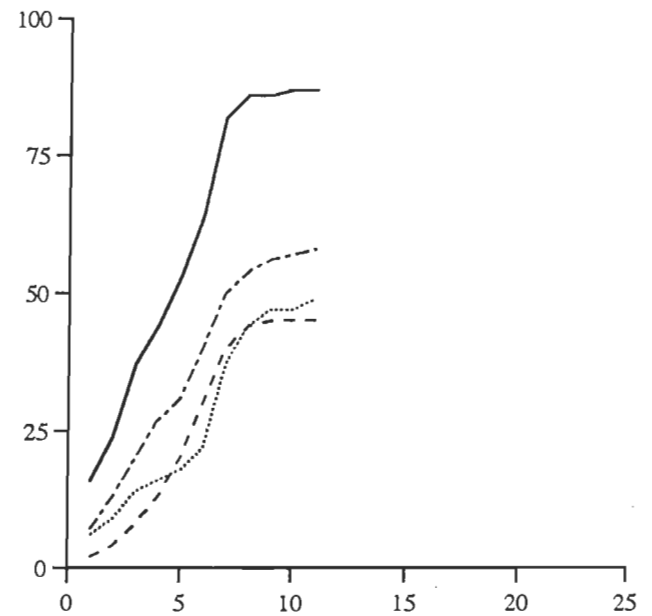
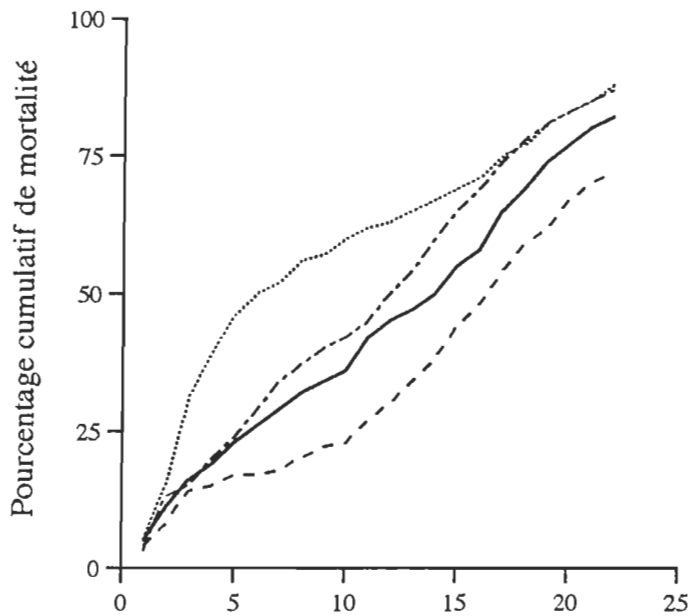
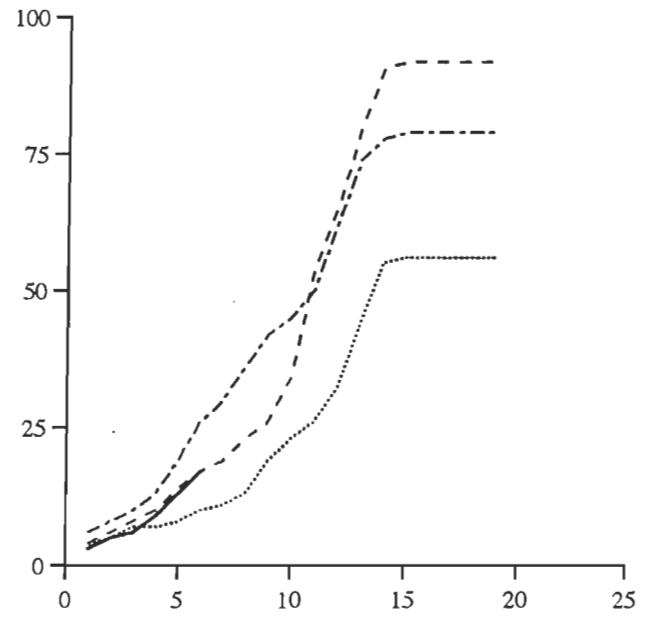
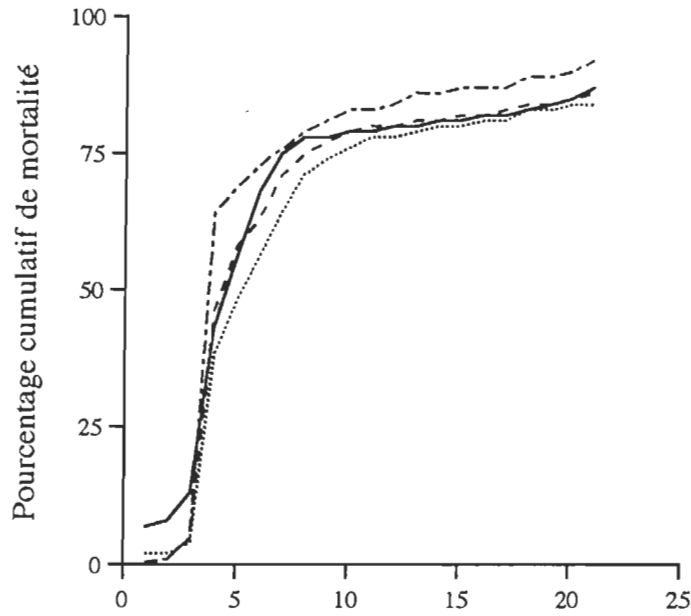
* Pour une période donnée (24 heures après le traitement ou à la fin de l'expérience), les moyennes accompagnées d'une même lettre ne sont pas significativement différentes, tel que déterminé par une ANOVA suivie d'un test de comparaisons multiples de Fisher.

**Les moyennes accompagnées d'une même lettre ne sont pas significativement différentes tel que déterminé par un test de Kruskal-Wallis, suivi de comparaisons multiples pour les moyennes démontrant des différences.

Tableau 6: Pourcentage moyen de mortalité (± 1 É.-T. entre parenthèses) des oeufs fraîchement fertilisés, 24 heures après un traitement basique et à la fin des expériences en milieu semi-naturel (T1 et T2); n = 5 réplicats par traitement.

Traitement	Pourcentage de mortalité	
	Après 24 heures	À la fin
Expérience T1		
pH 11.5	0a* (0)	64.3a* (17.8)
pH 11.0	0a (0)	53.8a (24.3)
pH 10.5	0a (0)	78.2a (29.5)
pH 7.0	0a (0)	71.0a (28.4)
Expérience T2		
pH 11.5	0.2a* (0.5)	71.1a* (26.7)
pH 11.0	1.8a (1.7)	61.3a (26.6)
pH 10.5	0.6a (1.0)	64.8a (27.8)
pH 7.0	0.6a (0.5)	67.7a (28.6)

* Pour une période donnée (24 heures après le traitement ou à la fin de l'expérience), les moyennes accompagnées d'une même lettre ne sont pas significativement différentes, tel que déterminé par une ANOVA suivie d'un test de comparaisons multiples de Fisher.



Temps (jour)

Figure 3: Mortalité cumulative après un traitement acide sur les oeufs oeillés, pour les expériences en laboratoire (L1 et L2) et en milieu semi-naturel (T1 et T2); pH 2.5 — , pH 3.0 , pH 3.5 ---- , pH 7.0 - - - - .

Tableau 7: Pourcentage moyen de mortalité (± 1 É.-T. entre parenthèses) des oeufs oeillés, 24 heures après un traitement acide et à la fin des expériences en laboratoire (L1 et L2); n = 5 réplicats par traitement.

Traitement	Pourcentage de mortalité	
	Après 24 heures	À la fin
Expérience L1		
pH 2.5	6.6a* (4.6)	87.0a* (6.1)
pH 3.0	1.6b (2.2)	84.1a (9.0)
pH 3.5	0.5b (0.7)	86.0a (9.0)
pH 7.0	0.4b (0.5)	91.8a (6.1)
Expérience L2		
pH 2.5	5.3a* (4.3)	81.8a* (11.4)
pH 3.0	5.5a (8.7)	87.5a (12.6)
pH 3.5	3.6a (4.5)	72.4a (11.6)
pH 7.0	2.8a (1.6)	87.4a (21.1)

* Pour une période donnée (24 heures après le traitement ou à la fin de l'expérience), les moyennes accompagnées d'une même lettre ne sont pas significativement différentes, tel que déterminé par une ANOVA suivie d'un test de comparaisons multiples de Fisher.

à l'expérience T1 étaient similaires pour les trois autres traitements. Pour l'expérience T2, nous avons observé après 24 heures que le traitement de pH 2.5 occasionnait significativement plus de mortalité que les autres traitements (Tableau 8).

3.5.4 Traitement basique sur les oeufs oeillés

Les traitements basiques étudiés ont eu peu d'effet sur les oeufs oeillés, mis à part l'expérience en laboratoire L1, 24 heures après les traitements (Figure 4). La mortalité au dernier jour des expériences en laboratoire L1 et L2 était similaire (Tableau 9). Tout comme pour le stade d'oeuf fraîchement fertilisé, aucune différence n'a été observée au dernier jour des expériences en milieu semi-naturel (Tableau 10).

3.5.5 Traitement acide sur les larves vésiculées

Le suivi de la mortalité sur les larves vésiculées montre que ce stade présente une sensibilité intermédiaire entre celles observées aux stades d'oeuf fraîchement fertilisé et d'oeuf oeillé. En laboratoire (L1 et L2) et en milieu semi-naturel (T2), il y a eu des mortalités significativement plus élevées après un traitement de pH 2.5 qu'aux autres traitements, 24 heures après les traitements (Figure 5), (Tableaux 11 et 12). Cependant, les traitements de pH 3.0, 3.5 et 7.0 de ces expériences n'ont pas produit des mortalités en relation avec le degré d'acidité des traitements. Le témoin (pH 7.0) a même produit des mortalités supérieures aux traitements de pH 3.0 et 3.5. Cependant, il semble y avoir eu une relation entre les mortalités et la sévérité des traitements dans l'expérience T1 (Figure 5). Pour ce stade, l'ensemble des expériences a produit des mortalités élevées, peu importe le traitement.

Tableau 8: Pourcentage moyen de mortalité (± 1 É.-T. entre parenthèses) des œufs oeillés, 24 heures après un traitement acide et à la fin des expériences en milieu semi-naturel (T1 et T2); n = 5 réplicats par traitement.

Traitement	Pourcentage de mortalité	
	Après 24 heures	À la fin
Expérience T1		
pH 2.5	2.6a* (1.7)	-**
pH 3.0	3.9a (2.9)	55.6a* (41.2)
pH 3.5	3.9a (3.7)	91.8a (8.0)
pH 7.0	5.7a (3.3)	78.8a (33.6)
Expérience T2		
pH 2.5	15.6a* (10.9)	87.4a* (18.4)
pH 3.0	5.5b (5.3)	48.7a (36.2)
pH 3.5	2.4b (2.5)	44.9a (34.6)
pH 7.0	7.5ab (4.4)	57.8a (33.5)

* Pour une période donnée (24 heures après le traitement ou à la fin de l'expérience), les moyennes accompagnées d'une même lettre ne sont pas significativement différentes, tel que déterminé par une ANOVA suivie d'un test de comparaisons multiples de Fisher.

**Valeur manquante causée par un problème logistique lors de l'expérimentation (voir texte).

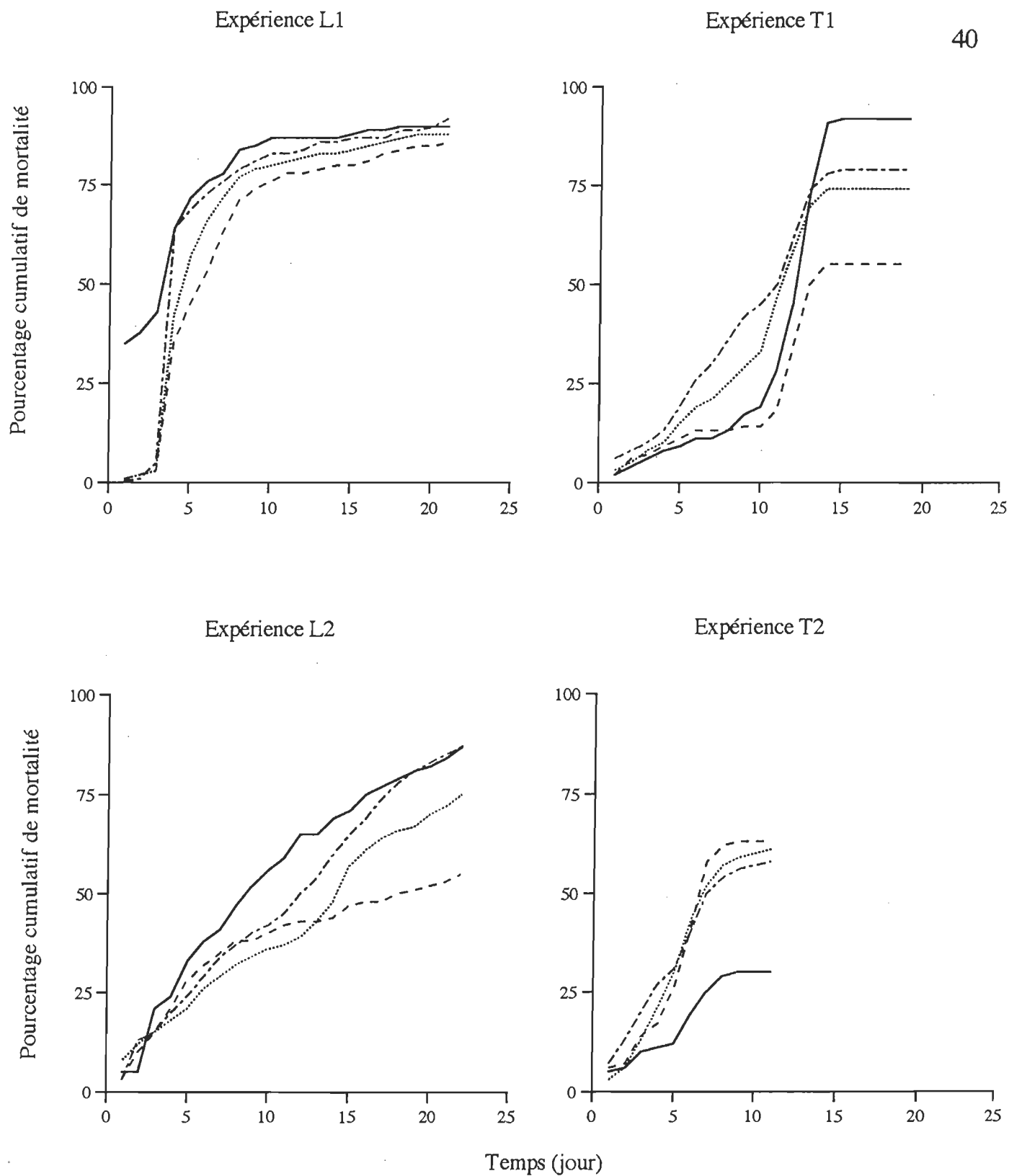


Figure 4: Mortalité cumulative après un traitement basique sur les œufs oeillés, pour les expériences en laboratoire (L1 et L2) et en milieu semi-naturel (T1 et T2); pH 11.5 — , pH 11.0 , pH 10.5 ---- , pH 7.0 -.-.-.

Tableau 9: Pourcentage moyen de mortalité (± 1 É.-T. entre parenthèses) des oeufs oeillés, 24 heures après un traitement basique et à la fin des expériences en laboratoire (L1 et L2); n = 5 réplicats par traitement.

Traitement	Pourcentage de mortalité	
	Après 24 heures	À la fin
Expérience L1		
pH 11.5	35.2a* (15.3)	90.2a* (4.9)
pH 11.0	1.2b (1.6)	88.0a (6.3)
pH 10.5	1.3b (1.6)	86.5a (4.8)
pH 7.0	0.4b (0.5)	91.8a (6.1)
Expérience L2		
pH 11.5	5.0a* (4.7)	87.0a* (22.6)
pH 11.0	7.7a (3.8)	74.5a (12.2)
pH 10.5	3.4a (3.6)	55.1a (33.2)
pH 7.0	2.8a (1.6)	87.4a (21.1)

* Pour une période donnée (24 heures après le traitement ou à la fin de l'expérience), les moyennes accompagnées d'une même lettre ne sont pas significativement différentes, tel que déterminé par une ANOVA suivie d'un test de comparaisons multiples de Fisher.

Tableau 10: Pourcentage moyen de mortalité (± 1 É.-T. entre parenthèses) des oeufs oeillés, 24 heures après un traitement basique et à la fin des expériences en milieu semi-naturel (T1 et T2); n = 5 réplicats par traitement.

Traitement	Pourcentage de mortalité	
	Après 24 heures	À la fin
Expérience T1		
pH 11.5	1.9a* (1.5)	91.7a* (5.4)
pH 11.0	2.6a (2.2)	74.3a (36.4)
pH 10.5	2.3a (2.8)	55.0a (38.9)
pH 7.0	5.7a (3.3)	78.8a (33.6)
Expérience T2		
pH 11.5	5.2a* (7.0)	30.1a* (17.3)
pH 11.0	2.7a (1.5)	60.6a (31.7)
pH 10.5	5.9a (7.0)	62.6a (33.6)
pH 7.0	7.5a (4.4)	57.8a (33.5)

* Pour une période donnée (24 heures après le traitement ou à la fin de l'expérience), les moyennes accompagnées d'une même lettre ne sont pas significativement différentes, tel que déterminé par une ANOVA suivie d'un test de comparaisons multiples de Fisher.

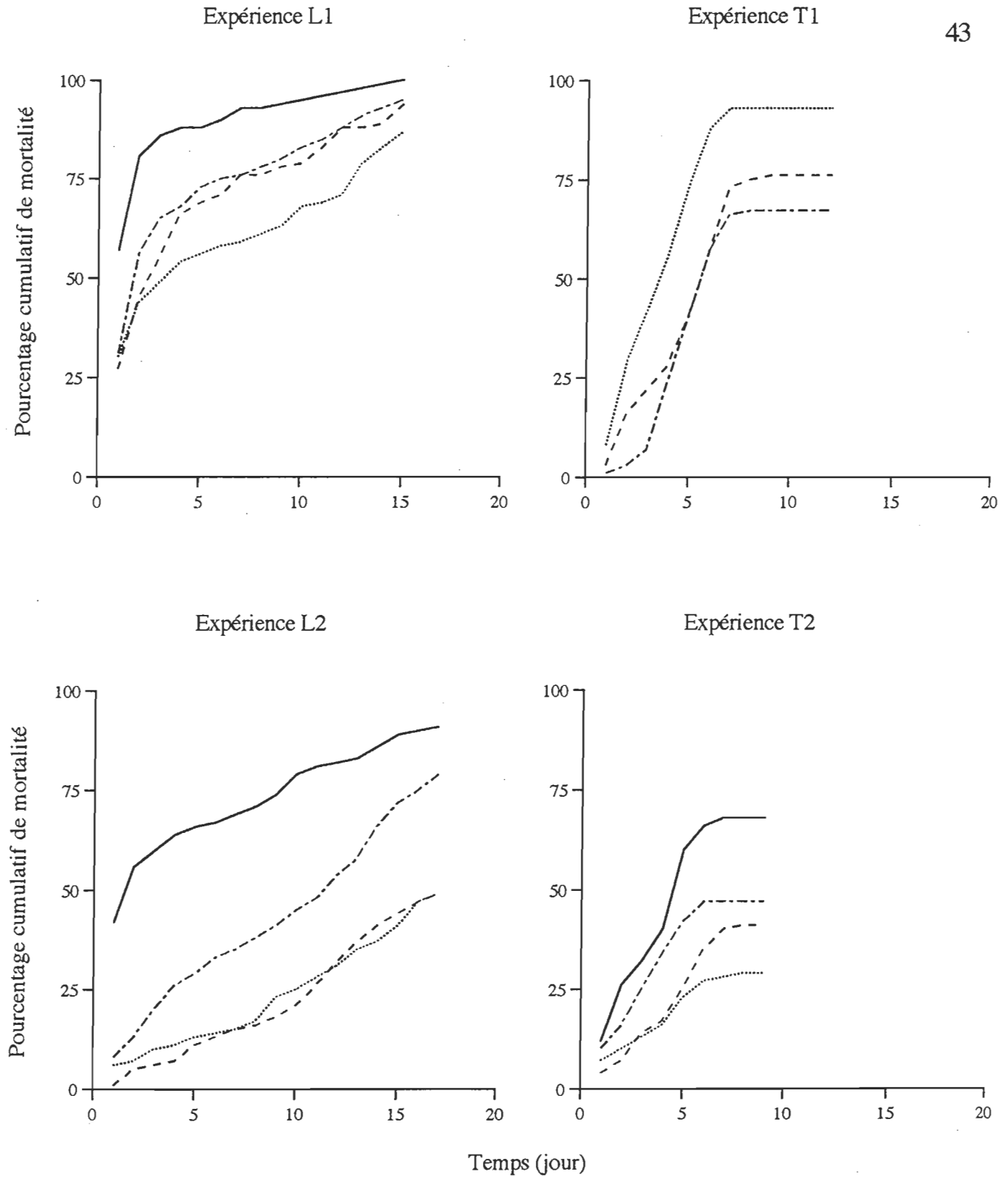


Figure 5: Mortalité cumulative après un traitement acide sur les larves vésiculées, pour les expériences en laboratoire (L1 et L2) et en milieu semi-naturel (T1 et T2); pH 2.5 — , pH 3.0 , pH 3.5 ---- , pH 7.0 -.-.- .

Tableau 11: Pourcentage moyen de mortalité (± 1 É.-T. entre parenthèses) des larves vésiculées, 24 heures après un traitement acide et à la fin des expériences en laboratoire (L1 et L2); n = 5 réplicats par traitement.

Traitement	Pourcentage de mortalité	
	Après 24 heures	À la fin
Expérience L1		
pH 2.5	56.6a* (23.5)	100a** (0.0)
pH 3.0	29.8b (17.6)	87.2a (17.9)
pH 3.5	27.2b (11.3)	93.6a (8.8)
pH 7.0	31.4b (11.7)	95.3a (8.5)
Expérience L2		
pH 2.5	41.8a* (21.9)	91.2a* (4.7)
pH 3.0	5.5b (9.3)	49.0b (28.6)
pH 3.5	1.3b (2.8)	49.3b (22.5)
pH 7.0	8.3b (14.9)	78.5a (21.3)

* Pour une période donnée (24 heures après le traitement ou à la fin de l'expérience), les moyennes accompagnées d'une même lettre ne sont pas significativement différentes, tel que déterminé par une ANOVA suivie d'un test de comparaisons multiples de Fisher.

**Les moyennes accompagnées d'une même lettre ne sont pas significativement différentes, tel que déterminé par un test de Kruskal-Wallis, suivi de comparaisons multiples pour les moyennes démontrant des différences.

Tableau 12: Pourcentage moyen de mortalité (± 1 É.-T. entre parenthèses) des larves vésiculées, 24 heures après un traitement acide et à la fin des expériences en milieu semi-naturel (T1 et T2); n = 5 réplicats par traitement.

Traitement	Pourcentage de mortalité	
	Après 24 heures	À la fin
Expérience T1		
pH 2.5	—**	—**
pH 3.0	8.2a* (5.9)	93.5a* (9.5)
pH 3.5	3.0b (2.3)	75.7a (25.3)
pH 7.0	0.9b (0.9)	67.2a (38.8)
Expérience T2		
pH 2.5	12.4a* (6.7)	68.0a* (34.3)
pH 3.0	7.1a (4.9)	29.2a (20.6)
pH 3.5	3.7a (3.4)	41.2a (18.1)
pH 7.0	10.5a (8.2)	47.5a (30.9)

* Pour une période donnée (24 heures après le traitement ou à la fin de l'expérience), les moyennes accompagnées d'une même lettre ne sont pas significativement différentes, tel que déterminé par une ANOVA suivie d'un test de comparaisons multiples de Fisher.

** Valeur manquante causée par un problème logistique lors de l'expérimentation (voir texte).

3.5.6 Traitement basique sur les larves vésiculées

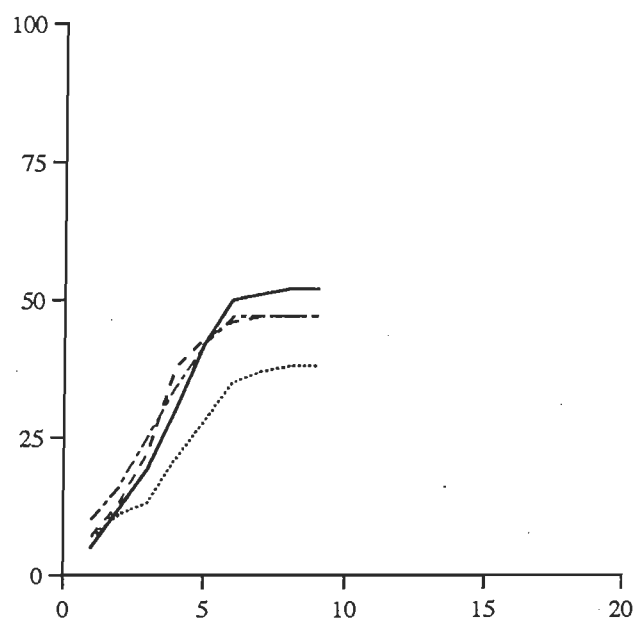
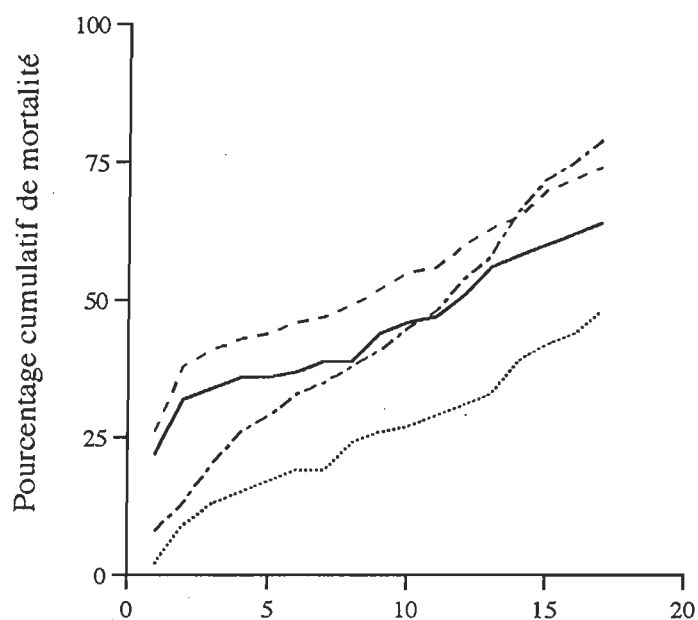
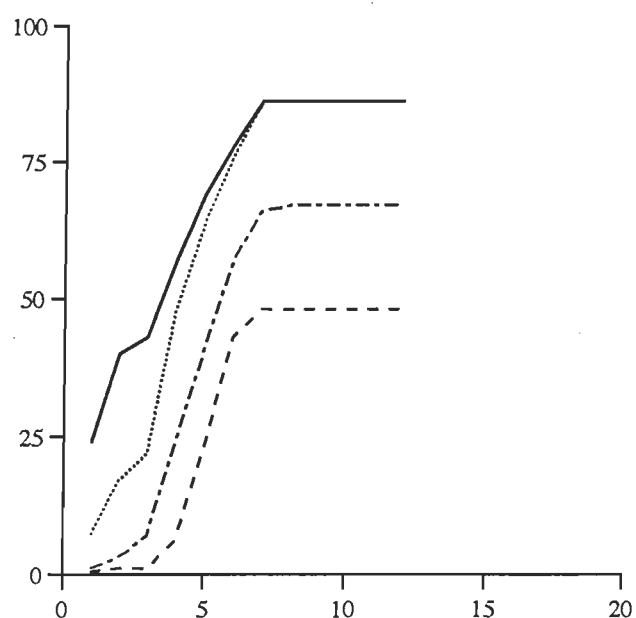
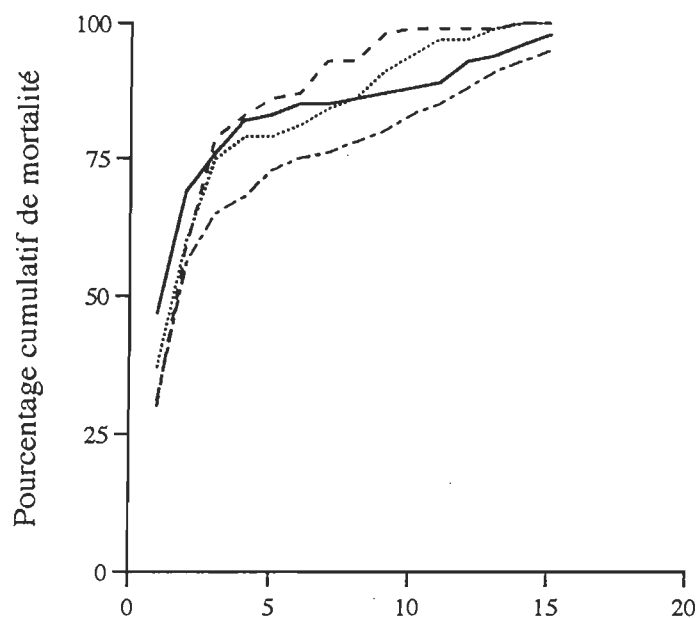
De façon générale, les courbes de mortalité après les traitements basiques sur les larves vésiculées étaient relativement près les unes des autres pour une même expérience (Figure 6).

En laboratoire, l'expérience L2 a montré quelques différences significatives entre les mortalités 24 heures après les traitements. Cependant, elles n'étaient pas nécessairement plus grandes avec l'augmentation du pH des traitements (Tableau 13).

En milieu semi-naturel, nous avons noté des différences significatives entre les mortalités des traitements basiques pour l'expérience T1, après 24 heures, mais ceci n'a pas été observé pour l'expérience T2 (Tableau 14).

3.6 Comparaison de la mortalité entre les expériences et pour un même traitement

La mortalité a été comparée entre les expériences (L1, L2, T1 et T2) afin de vérifier leur reproductibilité et de voir s'il y avait des différences de sensibilité entre elles. La mortalité a été analysée à des temps comparables entre les expériences soit 24 heures après l'application du traitement, lorsque les individus témoins étaient rendus au stade d'oeuf oeillé et de larve vésiculée ainsi qu'au dernier jour des expériences. De façon générale, les expériences L2, T1 et T2 ont montré des mortalités similaires entre les expériences. Cependant, l'expérience L1 a montré à quelques reprises des différences de mortalité comparativement aux trois autres expériences. Ces différences ont principalement été observées peu de temps après l'application des traitements de pH 2.5 et 11.5, et ce pour les trois stades étudiés (Tableaux 15, 16 et 17).



Temps (jour)

Figure 6: Mortalité cumulative après un traitement basique sur les larves vésiculées, pour les expériences en laboratoire (L1 et L2) et en milieu semi-naturel (T1 et T2); pH 11.5 — , pH 11.0 , pH 10.5 ---- , pH 7.0 - - - - .

Tableau 13: Pourcentage moyen de mortalité (± 1 É.-T. entre parenthèses) des larves vésiculées, 24 heures après un traitement basique et à la fin des expériences en laboratoire (L1 et L2); n = 5 réplicats par traitement.

Traitement	Pourcentage de mortalité	
	Après 24 heures	À la fin
Expérience L1		
pH 11.5	46.7a* (25.5)	97.6a** (3.5)
pH 11.0	36.5a (11.6)	99.7a (0.8)
pH 10.5	29.8a (24.3)	100a (0.0)
pH 7.0	31.4a (11.7)	95.3a (8.5)
Expérience L2		
pH 11.5	21.6a* (13.4)	63.6a* (23.7)
pH 11.0	2.3b (2.7)	47.6a (27.3)
pH 10.5	26.0a (27.0)	74.4a (23.7)
pH 7.0	8.3ab (14.9)	78.5a (21.3)

* Pour une période donnée (24 heures après le traitement ou à la fin de l'expérience), les moyennes accompagnées d'une même lettre ne sont pas significativement différentes, tel que déterminé par une ANOVA suivie d'un test de comparaisons multiples de Fisher.

**Les moyennes accompagnées d'une même lettre ne sont pas significativement différentes, tel que déterminé par un test de Kruskal-Wallis, suivi de comparaisons multiples pour les moyennes démontrant des différences.

Tableau 14: Pourcentage moyen de mortalité (± 1 É.-T. entre parenthèses) des larves vésiculées, 24 heures après un traitement basique et à la fin des expériences en milieu semi-naturel (T1 et T2); n = 5 réplicats par traitement.

Traitement	Pourcentage de mortalité	
	Après 24 heures	À la fin
Expérience T1		
pH 11.5	23.7a** (21.3)	86.1a* (18.8)
pH 11.0	7.1b (6.9)	85.6a (15.7)
pH 10.5	0.4c (0.6)	48.4a (44.4)
pH 7.0	0.9bc (0.9)	67.2a (38.8)
Expérience T2		
pH 11.5	5.1a* (7.4)	51.5a* (34.1)
pH 11.0	7.0a (4.7)	38.3a (11.5)
pH 10.5	7.4a (7.0)	47.2a (39.1)
pH 7.0	10.5a (8.2)	47.5a (30.9)

* Pour une période donnée (24 heures après le traitement ou à la fin de l'expérience), les moyennes accompagnées d'une même lettre ne sont pas significativement différentes, tel que déterminé par une ANOVA suivie d'un test de comparaisons multiples de Fisher.

** Les moyennes accompagnées d'une même lettre ne sont pas significativement différentes, tel que déterminé par un test de Kruskal-Wallis, suivi de comparaisons multiples pour les moyennes démontrant des différences.

Tableau 15: Comparaison du pourcentage de mortalité cumulatf moyen (± 1 É.-T.) entre les expériences en laboratoire (L1 et L2) et en milieu semi-naturel (T1 et T2), à différentes périodes du développement; traitement sur les oeufs fraîchement fertilisés.

Traitement	Temps de comparaison															
	Après 24 heures				Au stade d'oeuf oeillé				Au stade de larve vésiculée				À la fin de l'expérience			
	L1	L2	T1	T2	L1	L2	T1	T2	L1	L2	T1	T2	L1	L2	T1	T2
pH 2.5	98.5 ^{a*} (0.7)	81.2 ^b (8.4)	78.1 ^b (0.08)	74.6 ^b (2.8)	99.7 ^{a*} (0.5)	94.7 ^b (2.3)	95.9 ^b (4.1)	93.8 ^b (2.9)	99.7 ^{a*} (0.5)	98.1 ^a (0.5)	97.5 ^a (2.5)	95.7 ^a (3.3)	100 ^{a**} (0)	99.8 ^a (0.4)	99.6 ^a (0.9)	97.9 ^a (2.2)
pH 3.0	0.5 ^{ac**} (0.7)	3.1 ^b (2.7)	0 ^c (0)	2.5 ^{ab} (1.8)	20.0 ^{a*} (7.6)	25.9 ^a (10.9)	26.4 ^a (10.0)	27.2 ^a (5.3)	79.9 ^{a**} (5.3)	55.2 ^a (29.3)	46.0 ^{ab} (13.5)	31.2 ^b (7.3)	99.7 ^{a*} (0.6)	87.7 ^a (16.9)	86.8 ^a (19.2)	56.3 ^a (13.9)
pH 3.5	0.3 ^{a**} (0.8)	0.9 ^a (1.0)	0 ^a (0)	0.6 ^a (0.6)	11.5 ^{a*} (6.6)	19.5 ^b (5.5)	18.9 ^b (4.2)	38.0 ^c (7.7)	70.6 ^{a*} (35.5)	40.1 ^{bc} (15.0)	29.5 ^{bc} (11.3)	42.9 ^{ac} (9.6)	96.7 ^{a*} (4)	86.4 ^a (12.9)	68.4 ^a (28.3)	70.5 ^a (23.6)
pH 7.0	0.3 ^{a**} (0.6)	0.4 ^a (0.5)	0 ^a (0)	0.6 ^a (0.5)	20.4 ^{a*} (16.8)	18.8 ^a (6.3)	20.6 ^a (7.5)	30.8 ^a (7.6)	77.6 ^{a*} (21.4)	40.6 ^b (24.1)	27.4 ^b (10.5)	35.0 ^b (8.4)	98.3 ^{a*} (3.8)	81.1 ^a (31.9)	71.0 ^a (28.4)	67.7 ^a (28.6)
pH 10.5	0.7 ^{a**} (0.7)	0.2 ^a (0.4)	0 ^a (0)	0.6 ^a (1.0)	16.9 ^{a*} (6.4)	15.6 ^a (6.6)	21.5 ^{ab} (6.6)	30.6 ^b (7.4)	85.3 ^{a*} (15.2)	40.0 ^b (15.0)	27.8 ^b (10.4)	36.3 ^b (7.5)	100 ^{a**} (0)	78.9 ^b (25.3)	78.2 ^b (29.5)	64.8 ^b (27.8)
pH 11.0	0 ^{a**} (0)	0.2 ^a (0.4)	0 ^a (0)	1.8 ^a (1.7)	16.3 ^{a*} (9.9)	13.2 ^a (1.5)	16.9 ^a (4.7)	33.9 ^b (9.8)	89.0 ^{a*} (7.8)	32.8 ^b (10.6)	22.1 ^b (6.6)	37.6 ^b (12.0)	99.7 ^{a*} (0.6)	75.3 ^a (29.8)	53.8 ^a (24.3)	61.3 ^a (26.6)
pH 11.5	29.2 ^{a**} (23.4)	35.3 ^a (22.8)	0 ^b (0)	0.2 ^b (0.5)	45.7 ^{a**} (23.3)	63.8 ^a (18.9)	17.9 ^b (3.1)	43.8 ^a (21.4)	87.1 ^{a*} (7.6)	74.2 ^a (16.2)	26.7 ^b (7.1)	47.5 ^b (24.1)	97.8 ^{a**} (3.2)	94.5 ^{ac} (5.6)	64.3 ^b (17.8)	71.1 ^{bc} (26.7)

* Pour une période donnée (24 heures après le traitement, au stade d'oeuf oeillé, au stade de larve vésiculée ou à la fin de l'expérience), les moyennes accompagnées d'une même lettre ne sont pas significativement différentes, tel que déterminé par une ANOVA suivie d'un test de comparaisons multiples de Fisher.

**Les moyennes accompagnées d'une même lettre ne sont pas significativement différentes, tel que déterminé par un test de Kruskal-Wallis, suivi de comparaisons multiples pour les moyennes démontrant des différences.

Tableau 16: Comparaison du pourcentage de mortalité cumulatif moyen (± 1 É.-T.) entre les expériences en laboratoire (L1 et L2) et en milieu semi-naturel (T1 et T2), à différentes périodes du développement; traitement sur les oeufs oeillés.

Traitement	Temps de comparaison											
	Après 24 heures				Au stade de larve vésiculée				À la fin de l'expérience			
	L1	L2	T1	T2	L1	L2	T1	T2	L1	L2	T1	T2
pH 2.5	6.6 ^{ab*} (4.6)	5.3 ^a (4.3)	2.6 ^a (1.7)	15.6 ^b (10.9)	75.1 ^{a*} (12.5)	23.3 ^b (14.4)	19.6 ^b (4.4)	24.5 ^b (10.8)	87.0 ^{a*} (6.1)	81.8 ^a (11.4)	***	87.4 ^a (18.4)
pH 3.0	1.6 ^{a*} (2.2)	5.5 ^a (8.7)	3.9 ^a (2.9)	5.5 ^a (5.3)	63.5 ^{a*} (12.3)	46.3 ^a (29.0)	10.9 ^b (6.2)	8.8 ^b (6.6)	84.1 ^{a*} (9.0)	87.5 ^a (12.6)	55.6 ^a (41.2)	48.7 ^a (36.2)
pH 3.5	0.5 ^{a*} (0.7)	3.6 ^a (4.5)	3.9 ^a (3.7)	2.4 ^a (2.5)	70.8 ^{a*} (7.5)	16.6 ^b (4.8)	19.0 ^b (9.5)	3.8 ^c (1.8)	86.0 ^{ab*} (9.0)	72.4 ^{ac} (11.6)	91.8 ^b (8.0)	44.9 ^c (34.6)
pH 7.0	0.4 ^{a*} (0.5)	2.8 ^{bc} (1.6)	5.7 ^{cd} (3.3)	7.5 ^d (4.4)	76.0 ^{a*} (16.7)	24.4 ^b (9.9)	29.6 ^b (15.5)	13.4 ^b (6.3)	91.8 ^{a*} (6.1)	87.4 ^{ab} (21.1)	78.8 ^a (33.6)	57.8 ^b (33.5)
pH 10.5	1.3 ^{a*} (1.6)	3.4 ^a (3.6)	2.3 ^a (2.8)	5.9 ^a (7.0)	63.5 ^{a*} (14.8)	27.7 ^b (15.8)	13.1 ^{bc} (11.3)	7.4 ^c (9.3)	86.5 ^{a**} (4.8)	55.1 ^a (33.2)	55.0 ^a (38.9)	62.6 ^a (31.7)
pH 11.0	1.2 ^{a*} (1.6)	7.7 ^b (3.8)	2.6 ^a (2.2)	2.7 ^a (1.5)	72.4 ^{a**} (8.7)	21.3 ^b (9.5)	21.2 ^b (15.5)	5.8 ^c (2.2)	88.0 ^{a*} (6.3)	74.5 ^a (12.2)	74.3 ^a (36.4)	60.6 ^a (31.7)
pH 11.5	35.2 ^{a*} (15.3)	5.0 ^b (4.7)	1.9 ^b (1.5)	5.2 ^b (7.0)	78.1 ^{a*} (6.6)	33.1 ^b (19.0)	10.9 ^c (5.7)	6.3 ^c (8.1)	90.2 ^{a*} (4.9)	87.0 ^a (22.6)	91.7 ^a (5.4)	30.1 ^b (17.3)

* Pour une période donnée (24 heures après le traitement, au stade de larve vésiculée ou à la fin de l'expérience), les moyennes accompagnées d'une même lettre ne sont pas significativement différentes, tel que déterminé par une ANOVA suivie d'un test de comparaisons multiples de Fisher.

**Les moyennes accompagnées d'une même lettre ne sont pas significativement différentes, tel que déterminé par un test de Kruskal-Wallis, suivi de comparaisons multiples pour les moyennes démontrant des différences.

***Valeur manquante causée par un problème logistique lors de l'expérimentation (voir texte).

Tableau 17: Comparaison du pourcentage de mortalité cumulatif moyen (± 1 É.-T.) entre les expériences en laboratoire (L1 et L2) et en milieu semi-naturel (T1 et T2), au début et à la fin des expériences; traitement sur les larves vésiculées.

Traitement	Temps de comparaison							
	Après 24 heures				À la fin de l'expérience			
	L1	L2	T1	T2	L1	L2	T1	T2
pH 2.5	56.6a* (23.5)	41.8a (21.9)	.1	12.4c (6.7)	100a** (0.0)	91.2ab (4.7)	***	68.0b (34.3)
pH 3.0	29.8a* (17.6)	5.5b (9.3)	8.2b (5.9)	7.1b (4.9)	87.2a* (17.9)	49.0b (28.6)	93.5a (9.5)	29.2b (20.6)
pH 3.5	27.2a* (11.3)	1.3b (2.8)	3.0b (2.3)	3.7b (3.4)	93.6a* (8.8)	49.3b (22.5)	75.7a (25.3)	41.2b (18.1)
pH 7.0	31.4a* (11.7)	8.3ab (14.9)	0.9b (0.9)	10.5a (8.2)	95.3a* (8.5)	78.5a (21.3)	67.2a (38.8)	47.5a (30.9)
pH 10.5	29.8a* (24.3)	26.0a (27.0)	0.4a (0.6)	7.4a (7.0)	100a** (0.0)	74.4a (23.7)	48.4a (44.4)	47.2a (39.1)
pH 11.0	36.5a* (11.6)	2.3b (2.7)	7.1b (6.9)	7.0b (4.7)	99.7a** (0.8)	47.6b (27.3)	85.6c (15.7)	38.3b (11.5)
pH 11.5	46.7a* (25.5)	21.6b (13.4)	23.7ab (21.3)	5.1c (7.4)	97.6a* (3.5)	63.6bc (23.7)	86.1ab (18.8)	51.5c (34.1)

* Pour une période donnée (24 heures après le traitement ou à la fin de l'expérience), les moyennes accompagnées d'une même lettre ne sont pas significativement différentes, tel que déterminé par une ANOVA suivie d'un test de comparaisons multiples de Fisher.

**Les moyennes accompagnées d'une même lettre ne sont pas significativement différentes, tel que déterminé par un test de Kruskal-Wallis, suivi de comparaisons multiples pour les moyennes démontrant des différences.

***Valeur manquante causée par un problème logistique lors de l'expérimentation (voir texte).

3.7 Développement des individus après les traitements acides et basiques en laboratoire

Le développement des individus (pourcentage d'individus rendus au stade d'oeuf oeillé, au stade de larve vésiculée et au stade de nage vers le haut) a été suivi durant l'expérience L2 dès la neuvième journée. Les pourcentages de développement ont été comparés entre les traitements aux jours 9, 16 et 21. Aucune différence n'a été notée au niveau du développement à ces trois temps.

4. DISCUSSION

Cette étude montre que dans les premiers stades de vie, le Meunier noir est relativement tolérant à un changement brusque de pH de courte durée. Le plus grand pourcentage de mortalité a été obtenu après un traitement de pH 2.5 au niveau des oeufs fraîchement fertilisés. Les stades d'oeuf oeillé et de larve vésiculée sont plus tolérants aux traitements que le stade d'oeuf fraîchement fertilisé.

Les mortalités moyennes obtenues pour l'ensemble des traitements tendent vers une même valeur avec le temps, tant pour les expériences en laboratoire qu'en milieu semi-naturel. Dans les deux conditions expérimentales, la mortalité naturelle et celle causée par le système d'incubation semblent avoir masqué l'effet des traitements aux stades d'oeuf oeillé et de larve vésiculée en début d'expérience, ainsi qu'à la fin des expériences pour les trois stades étudiés. La mortalité élevée peut être attribuable aux conditions expérimentales, aux manipulations, à la qualité de l'eau d'incubation, à la sensibilité des organismes et à la qualité des gamètes (ASTM, 1980). Étant donné le grand nombre d'embryons observés, les mortalités élevées n'ont pas été le résultat d'un faible taux de fertilisation (Holtze et Hutchinson, 1989; Ingersoll *et al.*, 1990). De plus, les différences de mortalité entre conditions expérimentales et pour un même traitement ne sont pas le résultat de différences de sensibilité entre géniteurs (Rask, 1984), car les gamètes qui ont servi aux expériences L1-T1 et L2-T2 provenaient des mêmes individus. À quelques reprises, l'expérience L1 a donné des mortalités supérieures aux autres expériences. Les différences de mortalité obtenues entre cette expérience et les trois autres seraient attribuables à la baisse de pH qui est survenue en début de l'incubation pour cette expérience suite au traitement de l'eau d'incubation au bisulfite de

sodium (voir section 3.2). Cette chute de pH semble avoir augmenté la sensibilité des individus. En effet, un traitement basique de pH 11.5 au stade d'oeuf oeillé n'a pas eu d'effet sauf pour l'expérience L1 (24 heures après le traitement) (Tableau 16). Les taux de mortalité les plus élevés semblent se produire juste avant et au moment de l'éclosion. Cette observation a déjà été signalée chez la même espèce par Holtze et Hutchinson (1989) et pour la Carpe commune par Oyen *et al.* (1991). En effet, selon Sayer *et al.* (1993) une incubation inadéquate peut causer un retard du développement et nuire à la survie des individus.

Mis à part le fort taux de mortalité naturel et/ou l'effet du système d'incubation, la sensibilité des individus varie en fonction du stade de développement, du type de traitement (acide-basique) et du pH des traitements. Comme dans l'étude de Holtze et Hutchinson (1989), nous avons remarqué que chez le Meunier noir, l'oeuf fraîchement fertilisé est le stade le plus sensible alors que l'oeuf oeillé est le plus tolérant des stades étudiés. Ceci a également été noté chez l'Omble de fontaine (Baker et Schofield, 1982) et le Saumon atlantique (Daye et Garside, 1980b). En observant les mortalités moyennes au début et à la fin des expériences, nous remarquons que les traitements faits au stade d'oeuf fraîchement fertilisé ont produit les mortalités les plus importantes. La plus grande sensibilité de l'oeuf fraîchement fertilisé peut être attribuable à la plus grande perméabilité du chorion. Le chorion de l'oeuf possède une perméabilité très grande à l'eau et à diverses molécules juste après la fertilisation. Cependant, on observe avec le temps une augmentation de la résistance à l'osmose et à la diffusion (Lee et Gerking, 1977).

Au stade d'oeuf fraîchement fertilisé, le traitement acide de pH 2.5 a causé des mortalités supérieures au traitement basique de pH 11.5. Un traitement basique semble être moins nocif qu'un traitement acide pour des valeurs équidistantes de la neutralité (pH 7.0). Les ions OH^- des traitements basiques sont donc probablement

moins nocifs pour les jeunes stades du Meunier noir que les ions H^+ des traitements acides. Par contre, cette affirmation peut se révéler fausse si la comparaison est faite avec des produits autres que ceux utilisés pour préparer les solutions de traitement de cette expérience. Pour un même pH, des différences de mortalité peuvent être observées entre agents acidifiants ou alcalinisants. En milieu semi-naturel, la plus grande concentration de certains éléments dans les solutions de traitement de pH 2.5 versus 11.5 (Fe, Cu, Zn, Mn et Ba) peut être la cause de la plus grande mortalité à pH 2.5. Les mortalités moins importantes, après un traitement de pH 11.5 sur les oeufs fraîchement fertilisés, peuvent être reliées aux grandes concentrations de calcium dans ce traitement. En effet, Ingersoll *et al.* (1990) ont trouvé que le calcium était bénéfique à la survie des jeunes stades de l'Omble de fontaine. Il semble que le calcium pourrait influencer la perméabilité du chorion de l'oeuf (Ingersoll *et al.*, 1990) et aider à l'absorption du sodium et des chlorures (Trojnar, 1977b).

Une variation de seulement 0.5 unité de pH a produit des pourcentages de mortalité très différents tôt après l'application des traitements sur les oeufs fraîchement fertilisés. Contrairement à nos prévisions, les traitements de pH 3.0, 3.5, 10.5 et 11.0 ont causé des mortalités similaires aux témoins. De plus, aucune différence n'a été notée au niveau du développement des individus entre les traitements en laboratoire.

En laboratoire, un traitement de pH 11.5 sur les oeufs fraîchement fertilisés a causé des mortalités considérables à court terme, mais ceci n'a pas été observé en milieu semi-naturel. Certains facteurs non contrôlés en milieu semi-naturel peuvent avoir réduit l'effet du traitement de pH 11.5. Il est possible que des éléments solubilisés du substrat aient contribué à la survie des oeufs durant le traitement. Certains éléments, comme l'aluminium (Holtze et Hutchinson, 1989), peuvent être

bénéfiques à la survie des oeufs à court terme pour des pH normalement létaux. De plus, les cations polyvalents semblent influencer la perméabilité du chorion des oeufs (Baker et Schofield, 1982). Ces ions peuvent avoir atténué l'effet du traitement de pH 11.5, s'ils étaient en plus grande concentration en milieu semi-naturel.

La mortalité observée en laboratoire était en général supérieure à celle obtenue en milieu semi-naturel. Les différences de mortalité entre les deux conditions expérimentales peuvent être attribuables aux différences dans les conditions d'incubation (Rask, 1984). Même si la physico-chimie de l'eau d'incubation des deux conditions expérimentales était similaire, de légères différences peuvent avoir influencé la toxicité des traitements (ASTM, 1980). De plus, les différences dans la composition chimique des solutions de traitement sont susceptibles d'influencer la mortalité entre les conditions expérimentales (les solutions de traitement en milieu semi-naturel sont entrées en contact avec un substrat; voir section 2.2.4). Lors de la préparation des solutions de traitement en milieu semi-naturel, plusieurs éléments du substrat auraient pu être solubilisés. La présence de matière organique en suspension dans les eaux de la rivière du Loup peut avoir aussi influencé les solutions de traitement en milieu semi-naturel. La concentration des éléments analysés dans les solutions de traitement en milieu semi-naturel a varié principalement en fonction du pH des traitements mais elle a également varié entre les expériences. Des différences de concentration de certains éléments entre les solutions de traitement et pour une même expérience étaient prévisibles à cause de l'effet qu'a le pH sur leur solubilité en milieu aqueux.

Les différences de concentration obtenues entre les expériences et pour un même traitement peuvent être le reflet de l'hétérogénéité du substrat. De ce fait, les différences de mortalité pour un même traitement et entre expériences peuvent être

le résultat d'une différence de concentration de certains éléments dans les solutions de traitement. Comme il a été démontré pour l'aluminium (Baker et Schofield, 1982; Cleveland *et al.*, 1986; Kane et Rabeni, 1987; Holtze et Hutchinson, 1989; Ingersoll *et al.*, 1990), la concentration de certains éléments peut, selon le cas, nuire ou être bénéfique à la survie des jeunes stades de poisson. L'étude de Trojnar (1977b) a également montré que la présence de certains sels améliorerait la survie des larves de Meunier noir en milieu acide.

Nous pouvons conclure qu'un traitement de pH 2.5 au niveau des oeufs fraîchement fertilisés cause des mortalités importantes chez le Meunier noir. L'effet des autres traitements (sauf pH 11.5 en laboratoire) est beaucoup moins important. De plus, les stades d'oeuf oëillé et de larve vésiculée sont relativement plus tolérants aux traitements étudiés. L'étude a permis d'évaluer les traitements nécessaires pour causer des mortalités non négligeables chez les jeunes stades du Meunier noir. Dans le contexte d'un traitement en milieu naturel, les quantités d'acide sulfurique et de chaux hydratée nécessaires pour atteindre un pH de 2.5 et 11.5 seraient relativement grandes compte tenu des débits des cours d'eau à traiter. De plus, l'obtention des pH souhaités en milieu naturel serait d'autant plus difficile à obtenir que les effets les plus nocifs entre les pH 2.5 et 3.0 s'estompent rapidement. Une augmentation de la dose de traitement serait alors nécessaire. Enfin, les caractéristiques physico-chimiques de chaque plan d'eau devraient être prises en considération à cause de l'effet qu'a la physico-chimie de l'eau sur la toxicité des traitements.

Un changement brusque de pH dans un cours d'eau en vue d'un contrôle serait donc difficile à obtenir et à maintenir et les coûts associés seraient très élevés. Il faudrait également envisager l'installation et le suivi d'un système de neutralisation. Enfin, comme la roténone, l'utilisation d'un changement brusque et particulièrement

acide du pH ne serait pas spécifique au Meunier noir. L'utilisation de doses massives d'acides forts aurait un impact substantiel sur l'ensemble des communautés planctoniques et benthiques des milieux récepteurs. Compte tenu des résultats de cette recherche, l'utilisation du pH comme traitement des jeunes stades de Meunier noir pourrait occasionner des variations importantes de mortalité entre les sites de traitement. Les résultats obtenus dans cette étude suggèrent donc que cette approche offre un faible potentiel pour le contrôle du Meunier noir. Ce projet, qui représente la première tentative d'utilisation du pH comme mode de contrôle d'une espèce de poisson, permet d'affirmer qu'il serait hasardeux de poursuivre dans cette voie. D'autre part, les résultats de cette étude pourraient servir de base à une recherche plus élaborée, visant à déterminer les seuils limites de variations brusques du pH chez les poissons, dans le cas d'accidents environnementaux par exemple.

5. RÉFÉRENCES

- ASTM (American Society for Testing and Materials). 1980. Standard practice for conducting acute toxicity tests with fishes, macroinvertebrates, and amphibians. ASTM Standard E 729-80. ASTM, Philadelphia.
- Backes, C.A., et E. Tipping. 1987. Aluminium complexation by an aquatic humic fraction under acidic conditions. *Wat. Res.* 21: 211-216.
- Baker, J.P., et C.L. Schofield. 1982. Aluminum toxicity to fish in acidic waters. *Water Air Soil Pollut.* 18: 289-309.
- Beamish, R.J., et H.H. Harvey. 1972. Acidification of the La Cloche Mountain Lakes, Ontario, and resulting fish mortalities. *J. Fish. Res. Bd. Canada* 29: 1131-1143.
- Beamish, R.J., W. Lockhart, J. Van Loon, et H. Harvey. 1975. Long-term acidification and resulting effects on fishes. *Ambio* 4: 98-102.
- Bergerhouse, D.L. 1992. Lethal effects of elevated pH and ammonia on early life stages of walleye. *North American Journal of Fisheries Management* 12: 356-366.
- Brown, D.J.A. et K. Sadler. 1989. Acid toxicity and aquatic animals. Society for experimental biology. Seminar series 34. pp. 31-44.
- Chabot, J. et N. David. 1986. La majuscule dans la nomenclature biologique. *Can. J. Zool.* 64: 2072-2073.
- Cleveland, L., E.E. Little, S.J. Hamilton, D.R. Buckler et J.B. Hunn. 1986. Interactive toxicity of aluminum and acidity to early life stages of brook trout. *Trans. Amer. Fish. Soc.* 115: 610-620.
- Cleveland, L., E.E. Little, C.G. Ingersoll, R.H. Wiedmeyer et J.B. Hunn. 1991. Sensitivity of brook trout to low pH, low calcium and elevated aluminum

- concentrations during laboratory pulse exposures. *Aquat. Toxicol.* 19: 303-318.
- Dave, G. 1985. The influence of pH on the toxicity of aluminum, cadmium, and iron to eggs and larvae of the zebrafish, *Brachydanio rerio*. *Ecotox. Environ. Saf.* 10: 253-267.
- Daye, P.G. et E.T. Garside. 1977. Lower lethal levels of pH for embryos and alevins of Atlantic salmon, *Salmo salar* L. *Can. J. Zool.* 55: 1504-1508.
- Daye, P.G. et E.T. Garside. 1980a. Development, survival, and structural alterations of embryos and alevins of Atlantic salmon, *Salmo salar* L., continuously exposed to alkaline levels of pH, from fertilisation. *Can. J. Zool.* 58: 369-377.
- Daye, P.G. et E.T. Garside. 1980b. Structural alterations in embryos and alevins of the Atlantic salmon, *Salmo salar* L., induced by continuous or short-term exposure to acidic levels of pH. *Can. J. Zool.* 58: 27-43.
- DeLonay, A.J., E.E. Little, D.F. Woodward, W.G. Brumbaugh, A.M. Farag et C.F. Rabeni. 1993. Sensitivity of early-life-stage golden trout to low pH and elevated aluminum. *Environ. Toxicol. Chem.* 12: 1223-1232.
- Driscoll, C.T., J.P. Baker, J.J. Bisogni et C.L. Schofield. 1980. Effects of aluminum speciation on fish in dilute acidified waters. *Nature* 284: 161-164.
- Fiss, F.C. et R.F. Carline. 1993. Survival of brook trout embryos in three episodically acidified streams. *Trans. Amer. Fish. Soc.* 122: 268-278.
- Frenette, J.-J., et J.J. Dodson. 1984. Brook trout (*Salvelinus fontinalis*) population structure in acidified Lac Tantaré, Quebec. *Can. J. Fish. Aquat. Sci.* 41: 865-877.
- Gillet, C. et P. Roubaud. 1986. Survie embryonnaire précoce de 9 espèces de poissons d'eau douce après un choc de pH appliqué pendant la fécondation

- ou au cours des premiers stades du développement embryonnaire. *Reprod. Nutr. Dévelop.* 26 (6): 1319-1333.
- Guillemette, Y. 1986. Prélèvement et incubation d'oeufs de Doré jaune (*Stizostedion vitreum vitreum*) en nature. Ministère du Loisir, de la Chasse et de la Pêche, Direction de la gestion des espèces et des habitats, Service de l'aquaculture, monographie no 3-84-7090. 5p. + annexes.
- Holtze, K.E. et N.J. Hutchinson. 1989. Lethality of low pH and Al to early life stages of six fish species inhabiting PreCambrian shield waters in Ontario. *Can. J. Fish. Aquat. Sci.* 46: 1188-1202.
- Hulsman, P.F., P.M. Powles et J.M. Gunn. 1983. Mortality of walleye eggs and rainbow trout yolk-sac larvae in low-pH waters of the LaCroche mountains area, Ontario. *Trans. Amer. Fish. Soc.* 112: 680-688.
- Hurley, G.V., T.P. Foyle et W.J. White. 1989. Differences in acid tolerance during the early life stages of three strains of brook trout, *Salvelinus fontinalis*. *Water Air Soil Pollut.* 46: 387-398.
- Ingersoll, C.G., D.R. Mount, D.D. Gulley, T.W. LaPoint et H.L. Bergman. 1990. Effects of pH, aluminum, and calcium on survival and growth of eggs and fry of brook trout (*Salvelinus fontinalis*). *Can. J. Fish. Aquat. Sci.* 47: 1580-1592.
- Jagoe, C.H., T.A. Haines et F.W. Kircheis. 1984. Effects of reduced pH on three life stages of sunapee char *Salvelinus alpinus*. *Bull. Environ. Contam. Toxicol.* 33: 430-438.
- Jeffries, D. S., C. M. Cox, et P.J. Dillion. 1979. Depression of pH in lakes and streams in central Ontario during snowmelt. *J. Fish. Res. Board Can.* 36: 640-646.

- Jordahl, D.M. et A. Benson. 1987. Effect of low pH on survival of brook trout embryos and yolk-sac larvae in West Virginia streams. *Trans. Amer. Fish. Soc.* 116: 807-816.
- Kane, D.A. et C.F. Rabeni. 1987. Effects of aluminum and pH on the early life stages of smallmouth bass (*Micropterus dolomieu*). *Wat. Res.* 21 (2): 633-639.
- Lee, R.M., et S.D. Gerking. 1977. Sensitivity of fish eggs to acid stress. *Water Res.* 11: 621-626.
- Magnan, P. 1988. Interactions between brook charr, *Salvelinus fontinalis*, and nonsalmonid species: ecological shift, morphological shift, and their impact on zooplankton communities. *Can. J. Fish. Aquat. Sci.* 45: 999-1009.
- Magnan, P. 1989. The impact of cyprinid and catostomid introductions on brook char, *Salvelinus fontinalis*, populations: a review. *Physiol. Ecol. Jpn.* 1: 337-356.
- Magnan, P., P. East et M. Lapointe. 1990. Modes de contrôle des poissons indésirables: Revue et analyse critique de la littérature. Université du Québec à Trois-Rivières, pour le Ministère du Loisir, de la Chasse et de la Pêche du Québec et la Fondation de la Faune du Québec. *Rapp. Tech.* 198p.
- Magnan, P., M.A. Rodriguez, P. Legendre et S. Lacasse. 1994. Dietary variation in a freshwater fish species: relative contribution of biotic interactions, abiotic factors, and spatial structure. *Can. J. Fish. Aquat. Sci.* 51: 2856-2865.
- McCormick, J.H., K.M. Jensen et L.E. Anderson. 1989. Chronic effects of low pH and elevated aluminum on survival, maturation, spawning and embryo-larval development of the fathead minnow in soft water. *Water Air Soil Pollut.* 43: 293-307.
- Menendez, R. 1976. Chronic effects of reduced pH on brook trout (*Salvelinus fontinalis*). *J. Fish. Res. Board Can.* 33: 118-123.

- Mount, D.R., C.G. Ingersoll, D.D. Gulley, J.D. Fernandez, T.W. LaPoint et H.L. Bergman. 1988. Effect of long-term exposure to acid, aluminum, and low calcium on adult brook trout (*Salvelinus fontinalis*). 1. Survival, growth, fecundity, and progeny survival. Can. J. Fish. Aquat. Sci. 45: 1623-1632.
- Oyen, F.G.F., L.E.C.M.M. Camps et S.E.W. Bonga. 1991. Effect of acid stress on the embryonic development of the common carp (*Cyprinus carpio*). Aquatic Toxicology 19: 1-12.
- Petersen, R. C. Jr. et U. Persson. 1987. Comparison of the biological effects of humic materials under acidified conditions. The Science of the Total Environment 62: 387-398.
- Peterson, R.H., P.G. Daye et J.L. Metcalfe. 1980. Inhibition of atlantic salmon (*Salmo salar*) hatching at low pH. Can. J. Fish. Aquat. Sci. 37: 770-774.
- Peterson, R. H. et D. J. Martin-Robichaud. 1982. Water uptake by atlantic salmon ova as affected by low pH. Trans. Amer. Fish. Soc. 111: 772-774.
- Rand, G.M. et S.R. Petrocelli. 1985. Fundamentals of aquatic toxicology: methods and applications. Hemisphere Publishing Corporation. pp.1-28.
- Rask, M. 1984. The effects of low pH on perch, *Perca fluviatilis* L. II. The effects of acid stress on different development stages of perch. Ann. Zool. Fenn. 21:9-13.
- Roubough, P.J. 1982. Effects of low pH on eyed embryos and alevins of pacific salmon. Can. J. Fish. Aquat. Sci. 40: 1575-1582.
- Sayer, M.D.J., J.P. Reader et T.R.K. Dalziel. 1993. Freshwater acidification: effects on the early life stages of fish. Reviews in fish biology and fisheries 3: 95-132.

- Siddens, L.K., W.K. Seim, L.R. Curtis et G.A. Chapman. 1984. Toxicity of environmental acidity on various life stages of brook trout. Proc. West. Pharmacol. Soc. 27: 265.
- Sokal, R.R. et F.S. Rohlf. 1981. Biometry. 2nd ed., W.H. Freeman and Co. San Francisco, CA. 859p.
- Standards methods for the examination of water and wastewater. 1980. 15th edition. American Public Health Association. Washington, DC 20005. 1134p.
- Trojnár, J.R. 1977a. Egg hatchability and tolerance of brook trout (*Salvelinus fontinalis*) fry at low pH. J. Fish. Res. Board Can. 34: 574-579.
- Trojnár, J.R. 1977b. Egg and larval survival of white suckers (*Catostomus commersoni*) at low pH. J. Fish. Res. Board Can. 34: 262-266.
- Wetzel, R.G. 1983. Limnology, second edition. Saunders College Publishing. 767p.
- Witschi, W.A. et C.D. Ziebell. 1979. Evaluation of pH shock on hatchery-reared rainbow trout. Progressive Fish-Culturist 41 (1): 3-5.
- Wood, C.M., D.G. McDonald, C.G. Ingersoll, D.R. Mount, O.E. Johannsson, S. Landsberger et H.L. Bergman. 1990. Effects of water acidity, calcium, and aluminum on whole body ions of brook trout (*Salvelinus fontinalis*) continuously exposed from swim-up: a study by instrumental neutron activation analysis. Can. J. Fish. Aquat. Sci. 47: 1593-1603.

Annexe 1
pH effectif des traitements

Stade traité	Traitement						
	pH 2.5	pH 3.0	pH 3.5	pH 7.0	pH 10.5	pH 11.0	pH 11.5
<u>Laboratoire</u>							
Expérience L1							
oeuf fraîchement fertilisé	2.52	3.07	3.59	6.88	10.44	11.09	11.46
oeuf oeillé	2.51	2.94	3.51	6.93	10.50	11.01	11.55
larve vésiculée	2.51	2.94	3.70	7.12	10.67	10.96	11.57
Expérience L2							
oeuf fraîchement fertilisé	2.47	2.99	3.51	7.05	10.53	11.01	11.51
oeuf oeillé	2.51	3.00	3.64	6.78	10.50	11.06	11.52
larve vésiculée	2.48	3.00	3.48	6.96	10.54	10.90	11.47
<u>Semi-naturel</u>							
Expérience T1							
oeuf fraîchement fertilisé	2.60	3.10	3.44	6.39	10.40	11.00	11.58
oeuf oeillé	2.54	3.05	3.53	6.76	10.55	10.94	11.37
larve vésiculée	¹	3.08	3.60	¹	¹	¹	11.42
Expérience T2							
oeuf fraîchement fertilisé	2.56	3.13	3.62	7.00	10.08	10.70	11.31
oeuf oeillé	2.55	3.00	3.59	6.62	10.12	10.89	11.49
larve vésiculée	2.48	3.06	3.57	6.78	10.52	10.96	11.51

¹ Valeur manquante à cause d'un mauvais fonctionnement du pH-mètre.

Annexe 2

Liste des éléments analysés dans les solutions de traitement des expériences en milieu semi-naturel et limite de détection associée à chaque élément

Élément	Symbole	Limite de détection (mg/L)
Manganèse	Mn	0.001
Fer	Fe	0.002
Calcium	Ca	0.1
Magnésium	Mg	0.1
Sodium	Na	0.1
Potassium	K	0.1
Cuivre	Cu	0.001
Zinc	Zn	0.001
Nickel	Ni	0.004
Cobalt	Co	0.01
Aluminium	Al	0.01
Baryum	Ba	0.01
Bore	B	0.01
Cadmium	Cd	0.002
Chrome	Cr	0.002
Plomb	Pb	0.015
Béryllium	Be	0.01
Molybdène	Mo	0.01
Vanadium	V	0.01

Annexe 3

Concentrations de l'Al (total et labile), Fe, Cu, Ca, Mg, Zn, Mn, Na, K, Ba et Cr dans
les solutions de traitement de la première expérience en
milieu semi-naturel (expérience T1)

Solution de traitement	Élément						
	Al total (mg/L)	Al labile (mg/L)	Fe (mg/L)	Cu (mg/L)	Ca (mg/L)	Mg (mg/L)	Zn (mg/L)
Traitement au stade d'oeuf fraîchement fertilisé							
pH 2.5	0.28	0.28	0.224	0.012	13.9	0.8	0.112
pH 3.0	0.30	0.30	0.244	0.004	14.0	0.9	0.055
pH 3.5	0.11	0.10	0.076	0.003	5.8	0.7	0.020
pH 7.0	0.04	0.05	0.012	0.001	2.9	0.5	0.012
pH 10.5	0.14	0.12	0.053	0.001	19.1	0.5	0.001
pH 11.0	0.15	0.14	0.024	0.002	25.3	0.5	0.002
pH 11.5	0.19	0.19	0.006	0.003	45.9	0.2	0.002
Traitement au stade d'oeuf ocellé							
pH 2.5	0.25	0.25	0.541	0.002	8.0	0.8	0.048
pH 3.0	0.12	0.09	0.141	0.003	7.7	0.7	0.018
pH 3.5	0.14	0.14	0.086	0.002	4.8	0.7	0.013
pH 7.0	0.04	0.01	0.014	0.001	2.7	0.5	0.005
pH 10.5	0.11	0.11	0.057	0.001	14.0	0.5	0.002
pH 11.0	0.12	0.12	0.027	0.001	22.7	0.5	0.002
pH 11.5	0.25	0.25	0.004	0.001	43.6	0.2	<0.001
Traitement au stade de larve vésiculée							
pH 2.5	0.32	0.32	0.588	0.006	8.5	0.7	0.075
pH 3.0	0.20	0.20	0.206	0.003	6.7	0.7	0.031
pH 3.5	0.12	0.12	0.060	0.005	5.0	0.6	0.014
pH 7.0	0.04	0.01	0.014	0.002	2.7	0.5	0.005
pH 10.5	0.13	0.10	0.071	0.003	14.3	0.5	0.019
pH 11.0	0.24	0.21	0.041	0.006	24.6	0.4	0.007
pH 11.5	0.18	0.17	0.004	0.002	54.3	0.2	<0.001

Annexe 3 (suite)

Solution de traitement	Élément				
	Mn (mg/L)	Na (mg/L)	K (mg/L)	Ba (mg/L)	Cr (mg/L)
Traitement au stade d'oeuf fraîchement fertilisé					
pH 2.5	0.198	1.1	0.6	0.10	<0.02
pH 3.0	0.169	1.1	0.6	0.07	0.004
pH 3.5	0.082	0.9	0.9	<0.01	0.002
pH 7.0	<0.001	1.1	0.6	<0.01	<0.002
pH 10.5	0.007	0.9	0.4	<0.01	<0.002
pH 11.0	0.006	0.9	0.4	<0.01	0.004
pH 11.5	0.002	0.9	0.4	<0.01	0.004
Traitement au stade d'oeuf ocellé					
pH 2.5	0.145	0.9	0.5	0.08	<0.002
pH 3.0	0.071	0.9	0.4	0.03	0.003
pH 3.5	0.094	0.9	0.4	0.02	<0.002
pH 7.0	0.001	1.0	0.5	<0.01	<0.002
pH 10.5	0.008	0.9	0.4	<0.01	<0.002
pH 11.0	0.006	0.9	0.4	<0.01	0.003
pH 11.5	0.001	0.8	0.3	<0.01	0.004
Traitement au stade de larve vésiculée					
pH 2.5	0.315	1.7	0.8	0.07	0.004
pH 3.0	0.164	1.0	0.5	0.04	<0.002
pH 3.5	0.081	0.9	0.5	0.02	<0.002
pH 7.0	<0.001	1.1	0.6	<0.01	<0.002
pH 10.5	0.008	1.2	0.4	<0.01	0.004
pH 11.0	0.006	1.2	0.6	<0.01	0.004
pH 11.5	0.002	0.9	0.4	<0.01	0.004

Annexe 4

Concentrations de l'Al (total et labile), Fe, Cu, Ca, Mg, Zn, Mn, Na, K, Ba et Cr dans
les solutions de traitement de la deuxième expérience en
milieu semi-naturel (expérience T2)

Solution de traitement	Élément						
	Al total (mg/L)	Al labile (mg/L)	Fe (mg/L)	Cu (mg/L)	Ca (mg/L)	Mg (mg/L)	Zn (mg/L)
Traitement au stade d'oeuf fraîchement fertilisé							
pH 2.5	0.63	0.63	1.130	0.005	15.3	0.8	0.137
pH 3.0	0.40	0.40	0.326	0.009	16.4	0.8	0.059
pH 3.5	0.12	0.12	0.055	0.004	6.0	0.6	0.017
pH 7.0	0.03	0.01	0.027	0.001	3.4	0.5	0.006
pH 10.5	0.21	0.18	0.059	0.001	13.2	0.5	0.006
pH 11.0	0.15	0.13	0.030	0.001	26.8	0.5	0.003
pH 11.5	0.31	0.29	0.003	0.001	30.1	0.2	<0.001
Traitement au stade d'oeuf oeillé							
pH 2.5	0.23	0.23	0.244	0.004	10.1	0.8	0.103
pH 3.0	0.21	0.21	0.246	0.002	8.6	0.7	0.045
pH 3.5	0.22	0.21	0.107	0.005	4.7	0.7	0.021
pH 7.0	0.04	0.01	0.016	0.002	2.7	0.5	0.004
pH 10.5	0.27	0.20	0.083	0.002	11.5	0.5	0.002
pH 11.0	0.19	0.17	0.037	0.002	24.3	0.5	0.030
pH 11.5	0.10	0.10	0.005	0.003	28.3	0.5	0.002
Traitement au stade de larve vésiculée							
pH 2.5	0.27	0.27	0.387	0.008	9.5	8.0	0.041
pH 3.0	0.17	0.17	0.151	0.004	7.8	0.7	0.020
pH 3.5	0.16	0.16	0.110	0.004	4.6	0.6	0.015
pH 7.0	0.04	0.01	0.012	0.003	2.6	0.5	0.007
pH 10.5	0.12	0.10	0.069	0.001	14.4	0.5	<0.001
pH 11.0	0.23	0.21	0.016	0.002	30.6	0.4	<0.001
pH 11.5	0.30	0.29	0.006	0.002	55.6	0.1	<0.001

Annexe 4 (suite)

Solution de traitement	Élément				
	Mn (mg/L)	Na (mg/L)	K (mg/L)	Ba (mg/L)	Cr (mg/L)
Traitement au stade d'oeuf fraîchement fertilisé					
pH 2.5	0.636	0.9	0.5	0.11	0.004
pH 3.0	0.250	0.9	0.5	0.06	0.003
pH 3.5	0.068	0.9	0.5	0.02	<0.002
pH 7.0	0.002	1.0	0.4	<0.01	<0.002
pH 10.5	0.005	0.9	0.4	<0.01	0.002
pH 11.0	0.006	0.9	0.4	<0.01	0.004
pH 11.5	0.002	0.8	0.3	<0.01	0.005
Traitement au stade d'oeuf oeillé					
pH 2.5	0.284	1.0	0.5	0.11	<0.002
pH 3.0	0.461	1.0	0.5	0.05	<0.002
pH 3.5	0.247	1.0	0.5	0.03	<0.002
pH 7.0	<0.001	0.9	0.4	<0.01	0.006
pH 10.5	0.007	0.9	0.4	<0.01	0.005
pH 11.0	0.005	0.8	0.3	<0.01	0.005
pH 11.5	0.002	0.9	0.4	<0.01	0.005
Traitement au stade de larve vésiculée					
pH 2.5	0.110	1.1	0.4	0.07	0.004
pH 3.0	0.086	1.0	0.5	0.04	<0.002
pH 3.5	<0.001	1.0	0.4	<0.01	<0.002
pH 7.0	<0.001	1.1	0.6	<0.01	<0.002
pH 10.5	0.007	1.1	0.4	<0.01	<0.002
pH 11.0	0.003	1.3	0.4	<0.01	<0.002
pH 11.5	0.002	1.6	0.3	<0.01	<0.002